

## 明 細 書

## 移動ロボットの制御装置

## 技術分野

- 本発明は、2足移動ロボットなどの移動ロボットの制御装置に関し、
- 5 より詳しくは、膝、肘、胴体など、ロボットの脚や腕の先端部以外の部分を接地させる場合などに移動ロボットに作用する床反力（外力）を制御する装置に関する。

## 背景技術

- 10 2足移動ロボット等の脚式移動ロボットを、その脚の先端部を接地させり離床させたりしながら移動させる場合に、それらの脚の先端部に作用する床反力を制御する技術としては、本願出願人による特開平5-305585号公報（特許文献1）、特開平10-277969号公報（特許文献2）、特開2001-322076号公報（特許文献3）に
- 15 見られる技術が知られている。

- しかし、これらの技術は、元々、脚の先端部を床に接地させてロボットの移動を行なうことを想定したものであり、床反力を検出するセンサを脚の先端部に備えている。また、腕を備えたロボットにある作業を行わせる場合に、その腕の先端部に作用する力を制御するために、該腕の
- 20 先端部に力センサを備えたものも知られている。

これらの従来のロボットでは、元々、脚や腕の先端部に床反力などの外力が作用することを想定しており、脚や腕の先端部以外の箇所、例えば膝には、外力を検出するセンサが備えられていない。このため、膝に作用する外力（床反力など）を制御することはできなかった。

例えば従来の人間型ロボットをひざまずかせた状態では、左右の膝に作用する床反力は、床の凹凸に依存（支配）され、また、床の凹凸に応じて、脚の関節角を調節することが行われていなかった。このため、床の凹凸によって、ロボットの床との接地部位が揺れるなど、その接地部位の接地状態が不安定なものとなる場合もあった。そして、このような状態では、ロボットの動作や作業を行おうとするとロボットの姿勢が不安定にある場合があった。

また、例えばロボットがひざまずいた状態から立ち上がる場合に、実際の床の傾きが目標歩容で想定していた傾きと異なっていた場合には、ロボットの重心位置が適切に制御されず、ロボットの上体の姿勢が傾いたまま立ち上がろうとしてしまうために、該ロボットが転倒してしまう恐れもあった。

また、ロボットが椅子に座ったまま、その姿勢を安定に保ちつつ動作や作業を行う場合において、椅子から立ち上がる時、あるいは椅子に座る時に、ロボットの姿勢を適切な姿勢に復元できるようにするために、ロボットの各脚の足平に作用する床反力のみならず、椅子からロボットの臀部に作用する反力も適切に制御できることが望ましい。

本発明はかかる背景に鑑みてなされたものであり、移動ロボットの膝、肘、胴体、臀部など、脚や腕の先端部以外の部分が、床あるいは床の延長物と考えられる対象物と接触して外力を受ける状態において、ロボットの脚や腕の先端部に作用する外力のみならず、脚や腕の先端部以外の部分に作用する外力をも適切に制御し、移動ロボットの姿勢を安定に保つことを可能とする移動ロボットの制御装置を提供することを目的とする。

本発明の移動ロボットの制御装置の第1発明は、基体と、該基体の移動のために該基体に連結されて外部と接触する複数のリンク機構とを備えると共に、該基体と各リンク機構の先端部との間に、該基体に対して各リンク機構の先端部を可動とする複数の関節が設けられ、前記複数の

5 リンク機構のうちの1つ以上の特定リンク機構の先端部と前記基体との間の所定部位で外部と接触する特定動作姿勢に動作可能な脚式移動ロボットの制御装置において、

前記特定動作姿勢で前記所定部位に作用する外力を検出または推定する外力検出手段と、

- 10 前記特定動作姿勢における前記所定部位の外力の目標値である目標外力を決定する目標外力決定手段と、

前記検出または推定された外力が前記目標外力に近づくように、少なくとも前記所定部位と前記基体との間に存在する関節の変位を制御する関節変位制御手段とを備えたことを特徴とするものである。

- 15 かかる第1発明によれば、前記特定姿勢動作において、前記所定部位が外部と接触する。この所定部位は、前記基体と前記特定リンク機構の先端部との間で該特定リンク機構に設けられている部位であるが、その所定部位に作用する外力は前記外力検出手段によって検出または推定される。そして、この検出または推定された外力が前記目標外力決定手段
- 20 で決定した目標外力に近づくように、少なくとも前記所定部位と前記基体との間に存在する関節の変位を制御することによって、該所定部位に作用する外力を適切に制御することができる。その結果、ロボットの姿勢を安定に保つことが可能となる。

- 25 かかる第1発明では、前記特定リンク機構は例えば脚体である（第2発明）。この場合には、前記所定部位は、該脚体の先端部と基体との間の中間部位（例えば膝など）となる。従って、例えば人間型ロボットの

膝付き姿勢で、その膝に作用する外力を制御できる。なお、ロボットに備える前記リンク機構は、脚体だけに限らず、腕体を含んでもよい。その場合、前記特定リンク機構は、脚体だけでもよいが、腕体だけでもよく、あるいは、脚体と腕体との両者を含んでもよい。

- 5      また、前記第 1 発明（あるいは第 1、第 2 発明）では、例えば、前記特定リンク機構は、前記基体に関節を介して連結された臀部から延設された脚体であり、前記所定の部位は、前記臀部である（第 3 発明）。この場合、ロボットが腰掛ける場合などにおいて、臀部に作用する外力を制御してロボットの姿勢（特に上体などの基体の姿勢）を適切な安定姿勢に制御できる。

- 10      さらに、前記第 1 発明（あるいは第 1～第 3 発明）では、前記移動ロボットの前記基体などの第 2 の所定部位の実姿勢を検出する実姿勢検出手段と、該第 2 の所定部位の目標姿勢を決定する目標運動決定手段とを備え、前記目標外力決定手段は、少なくとも前記第 2 の所定部位の実姿勢と目標姿勢との偏差に応じて前記目標外力を決定することが好ましい（第 4 発明）。

この第 4 発明によれば、前記第 2 の所定部位（例えば基体）の実姿勢を所要の目標姿勢に復元するように前記所定部位に作用する外力を制御できるので、ロボットの姿勢の安定性を高めることができる。

- 20      さらに第 1 発明（あるいは第 1～第 4 発明）では、前記移動ロボットの前記基体などの第 2 の所定部位の実姿勢を検出する実姿勢検出手段と、該第 2 の所定部位の目標姿勢を決定する目標運動決定手段とを備え、前記関節制御手段は、前記第 2 の所定の部位の実姿勢と目標姿勢との偏差に応じて外力の操作量を決定する手段とを備え、前記目標外力と前記外力の操作量との合力に前記検出または推定された外力を近づけるように前記関節の変位を制御することが好ましい（第 5 発明）。
- 25



この第 5 発明によれば、前記所定部位に作用する外力を目標外力に近づけつつ、前記第 2 の所定部位（例えば基体）の実姿勢を目標姿勢に近づけるように関節の変位を制御するので、ロボットの姿勢を安定化すると同時に、所定部位に作用する外力を適切に制御できる。

- 5     なお、第 4 発明および第 5 発明における第 2 の所定の部位は、前記特定動作姿勢で外部と接触する所定部位と同じであってもよい。

#### 図面の簡単な説明

- 図 1 は、本発明に関連した第 1 参考例および第 2 参考例に係るロボットの全体外観図、図 2 は第 1 参考例の制御装置の機能的構成を示すブロック図、図 3（a）～（c）および図 4（a）～（c）は、第 1 参考例のロボット（4 脚ロボット）の動作を説明するための図、図 5（a）～（c）は第 1 参考例における重みの設定例を示すグラフ、図 5（d）は第 1 参考例における ZMP（目標全床反力中心点）の設定例を示すグラフである。図 6 は第 1 参考例のノードの階層構造を示す図、図 7 は目標ノード床反力中心点と重みとの関係を示す図、図 8 は目標ノード床反力と重みとの関係を示す図、図 9 は第 1 参考例の制御装置のメインルーチン処理を示すフローチャートである。図 10～図 14 はそれぞれ第 1 参考例のロボット（4 脚ロボット）の目標ノード床反力並進力成分、実ノード床反力並進力成分、実ノード床反力モーメント、補償全床反力モーメント、ノード補償床反力モーメントを例示する図である。図 15 および図 16 は第 1 参考例におけるノード補償角による位置修正（コンプライアンス動作）を説明するための図、図 17～図 21 はそれぞれ第 1 参考例における階層型コンプライアンス動作決定部、補償全床反力モーメント分配器、 $\theta_{1423}$  決定部（補償角決定部）、 $\theta_{14}$  決定部（補償角決定部）、機構変形補償量算出部の機能的構成を示すブロック図、図 22

は補償角を決定する処理を示すフローチャート、図 2 3 は第 1 参考例のロボットに係る階層構造の他の例を説明するための図である。図 2 4 は第 2 参考例のロボット（6 脚ロボット）の階層構造を説明するための図、図 2 5 は第 2 参考例における階層型コンプライアンス動作決定部の機能的構成を示すブロック図、図 2 6 ～図 2 8 はそれぞれ第 2 参考例のロボット（6 脚ロボット）の目標ノード床反力の並進力成分、実ノード床反力の並進力成分、実ノード床反力モーメントを例示する図、図 2 9 (a), (b) は第 2 参考例におけるノード補償床反力モーメントの設定手法を説明するための図、図 3 0 および図 3 1 は第 2 参考例におけるノード補償角による位置修正（コンプライアンス動作）を説明するための図である。図 3 2 および図 3 3 はそれぞれ第 2 参考例における  $\theta_{145236}$  決定部（補償角決定部）、 $\theta_{145}$  決定部（補償角決定部）の機能を示すブロック図、図 3 4 は第 2 参考例のロボットに係る階層構造の他の例を説明するための図である。図 3 5 は第 3 参考例における階層型コンプライアンス動作決定部の機能的構成を示すブロック図、図 3 6 は第 3 参考例における制御装置のメインルーチン処理を示すフローチャート、図 3 7 ～図 3 9 は第 3 参考例における概念および用語を説明するための図、図 4 0 は第 3 参考例における床形状推定器の機能を示すブロック図、図 4 1 は図 4 0 における床高さ偏差推定処理サブルーチンの処理を示すフローチャートである。図 4 2 および図 4 3 はそれぞれ 4 脚ロボット、6 脚ロボットにおける階層相対化の処理を説明するための図である。図 4 4 は床形状推定に係る各ノードの要求モードの設定例を示す図、図 4 5 ～図 5 5 は床形状推定処理を示すフローチャートである。図 5 6 は第 4 参考例における床形状推定器の機能を示すブロック図、図 5 7 は第 5 参考例における床形状推定器の機能を示すブロック図である。図 5 8 および図 5 9 は本発明の第 1 実施形態におけるロボット（2 足移動ロボッ

ト) が膝を付いた状態を示す図、図 6 0 は第 1 実施形態におけるロボットの膝の床反力センサの構成を示す図、図 6 1 は第 1 実施形態におけるノードの階層構造を示す図、図 6 2 は第 1 実施形態における階層型コンプライアンス動作決定部の機能的構成を示すブロック図である。図 6 3 (a) ~ (c) は第 1 実施形態におけるロボットの上体の姿勢の修正手法を説明するための図、図 6 4 は第 1 実施形態におけるロボットの上体の位置姿勢の修正手法を説明するための図、図 6 5 は第 1 実施形態における逆キネマティクス演算部の機能を示すブロック図である。図 6 6 は第 2 実施形態における逆キネマティクス演算部の機能を示すブロック図、図 6 7 および図 6 8 は第 2 実施形態におけるロボットの姿勢の修正手法を説明するための図である。図 6 9 は第 3 実施形態におけるロボットの構成を示す図、図 7 0 は第 3 実施形態におけるノードの階層構造を示す図である。

## 15 発明を実施するための最良の形態

まず、本明細書の実施形態の説明で用いる主な用語について説明しておく。

本願出願人が先に提案した特開平 1 0 - 2 7 7 9 6 9 号公報の複合コンプライアンス制御の技術においては、ロボットの脚先端部（足平）から床反力を受けることを前提として、脚毎に床反力を分別した。これに対して、本明細書の参考例では、例えば人間型ロボットがひざまづいた状況や腰掛けた状況、腕を接地させた状況など、脚先端部以外からも床反力を受ける状況までも考慮する。このため、脚式移動ロボットの所要の動作において床と接して反力を受ける該ロボットの部位を「接地部位」と呼ぶ。この場合、「床」は、通常の意味での床（あるいは地面）だけではなく、該床（あるいは地面）に固定された椅子（ロボットが腰

掛ける椅子) 等のように、ロボットがその動作において接触して反力を受ける対象物も、「床」に含まれるものとする。従って、例えば2足移動ロボットが椅子などに腰掛けるときには、該ロボットの腰部は接地部位に相当するものとなる。なお、脚式移動ロボットの通常的な移動時

5 (2足移動ロボットの歩行時など) には、各脚の先端部(足平など) が接地部位に相当するものとなることはもちろんである。

接地部位を分類(区別)するに当たっては、ロボットの同一のリンク(単一の剛体に相当する部分) 上で接地部位が複数箇所に分離されて分布している場合(同一のリンクの、互いに分離した複数の部分が接地し  
10 ている場合) でも、すなわち同一リンク上で複数の接地面がつながって  
いなくても、これらをまとめてひとつの接地部位と定義する。例えば、  
スパイクピンが4本装着された接地部位がそれらのスパイクピンを介し  
て接地する場合には、4本のスパイクピンのそれぞれの接地面をまと  
めてひとつの接地部位とみなす。ただし、それらの接地面を必ずしも一  
15 にまとめる必要はない。

第  $n$  接地部位とは、このようなルールの基で分類(区別) されて識別番号  $n$  ( $n=1,2,3,\dots$ ) を割り振られた接地部位の識別名称である。

接地部位床反力とは、接地部位に作用する床反力とし、特に、第  $n$  接地部位に作用する床反力を第  $n$  接地部位床反力という。また、全床  
20 反力とは、すべての接地部位に作用する床反力の合力とする。更に、床  
反力中心点とは、床反力とその点に発生するモーメントの水平成分が0  
となるような作用点とする。

なお、接地部位床反力、全床反力などの床反力は、一般的には、力の  
作用点と、その作用点にかかる並進力およびモーメントとの組によって  
25 表現され、同一の床反力に対して、それを表現する作用点と、並進力お  
よびモーメントとの組は無限にある。その中には、鉛直軸まわりの成分

（鉛直成分）を除くモーメント成分（モーメントの水平成分）が 0 となるような点を作用点として用いる床反力の表現が存在する。この表現における作用点を、本明細書では床反力中心点という。また、床反力中心点を、床反力がその点に発生するモーメントの床面平行成分（床面に平行な成分）が 0 となるような点として定義してもよい。

尚、この明細書で「床面」は、本願出願人が先に提案した特開平 5-318340 号公報に記載される仮想的な床面（目標歩容上で想定される床面であって、実際の床面とは必ずしも一致しない）であっても良い。

補足すると、接地部位の床反力中心点は、その接地部位が接地している状態では、通常、その接地面（床との接触面）上に設定される。一方、接地部位が空中を移動しているときの接地部位床反力は常に 0 であるので、どの点を作用点としても該接地部位床反力のモーメント水平成分は 0 である。つまり、床反力中心点は任意に設定できる。ただし、ロボットの動作制御を円滑に行なう上では、目標とする床反力中心点は、連続的に移動することが望ましい。そこで、本明細書の実施形態では、接地部位床反力の床反力中心点は、接地部位が空中を移動するときに、接地部位と共に移動する作用点であるとする。

本明細書の実施形態においては、少なくとも実床反力（ロボットに実際に作用する床反力）に応じて各接地部位の位置姿勢の修正を行なうコンプライアンス制御動作において、単に、各接地部位毎に、互いに無関係に（独立して）コンプライアンス制御動作を行うのではない。本明細書の実施形態は、各接地部位をツリー構造で分類し、少なくとも分類された各グループに作用する実床反力（各グループに含まれる全ての接地部位に作用する実床反力もしくはその合力）に基づき、接地部位の位置姿勢の修正動作を決定することに特徴がある。尚、以降、ツリー構造で分類することを「階層化」と呼ぶこともある。

本明細書の実施形態における脚式移動ロボットの歩容生成装置が生成する変数の目標値には、変数名の頭に「目標」を付ける。実際の脚式移動ロボットにおける当該変数の値（真の値はわからないので、実際には、検出値または推定値）には、変数名の頭に「実」を付ける。前記「実床

5 反力」はその例である。

後述するコンプライアンス制御（床反力制御）の全床反力（ロボットのすべての接地部位に作用する実床反力の合力）の目標を目標全床反力と呼ぶ。目標全床反力のモーメント水平成分が0となる点を目標全床反力中心点と呼ぶ。

10 移動ロボットの目標歩容の運動（目標歩容におけるロボットの各部位の運動）が発生する慣性力と該ロボットに作用する重力との合力のモーメント水平成分が0となる床面上の点を目標ZMPと呼ぶ。なお、目標歩容の運動は、目標歩容におけるロボットの各部位の目標位置姿勢の時系列によって定まるので、その各部位の目標位置姿勢の時系列を総称的に目標歩容の運動もしくは目標運動という。補足すると、これらの時系列を規定できるならば、上記の如く定義した目標運動と異なる表現で目標運動を記述してもよい。例えば、ロボットの各関節の目標変位の時系列と基体などの特定の部位の目標位置姿勢の時系列との組を目標運動としてもよい。

20 目標全床反力は、通常、目標歩容の運動パターン（目標運動の時系列パターン）に対して動力学的に平衡する全床反力である。従って、通常、目標全床反力中心点は、目標ZMPに一致する。そこで、以下の説明では、多くの場合、目標全床反力中心点と目標ZMPとを区別せずに使用する。ただし、例外的に、本願出願人が先に提案した特許第32698  
25 52号などにて説明しているロボットの制御の場合には、目標全床反力中心点と目標ZMPとは一致するとは限らない。以下の説明では、目標

ZMPという言葉を用いる場合もあるが、厳密には目標全床反力中心点  
と言うべき箇所もある。

尚、移動ロボットの目標歩容で該ロボットが床反力以外の反力（外  
力）を環境から受けるように想定してもよい。そして、その床反力以外  
5 の反力（外力）を、例えば目標対象物反力と称し、先に述べた目標ZMP  
の定義を次のように拡張しても良い。即ち、ロボットの目標歩容の運  
動パターンによって発生する慣性力と該ロボットに作用する重力と目標  
対象物反力との合力を動力学的に求め、その合力が床面上のある点に発  
生するモーメントが、鉛直軸まわりの成分を除いて0であるならば、そ  
10 の点を改めて目標ZMPとするようにしても良い。ただし、目標対象物  
反力も、床反力の一形態としてとらえるならば、目標ZMPの定義は、  
先に述べた定義のままでよい。

以上を前提として、まず、本発明に関連する参考例および本発明の実  
施形態を以下に詳細に説明する。なお、本明細書では、説明の便宜上、  
15 まず、しばらくの間、参考例を説明し、その後に本発明の実施形態を説  
明する。参考例は、第1～第5参考例までである。

#### [第1参考例]

図1は、第1および第2参考例に係る一般的な多脚の移動ロボット  
20 （脚式移動ロボット）の外観図である。ただし、図1では、ロボット1  
は、第1脚#1～第6脚#6までの6個の脚（脚体）を有するものとし  
て図示しているが、第1参考例においては、第5脚#5および第6脚#  
6は無いものとする。すなわち、第1参考例では、ロボット1は、第1  
脚#1～第4脚#4の4個の脚（脚体）を有する4脚ロボットであると  
25 する。図1では、第2参考例に係るロボット1の構成要素については、  
括弧付きの参照符号を付している。

## 1 2

図 1 に示すように、第 1 参考例のロボット 1（4 脚ロボット）では、  
該ロボット 1 の基体である上体 2 4 の右側部から 2 個の脚（第 1 脚 # 1、  
第 3 脚 # 3）が前後方向に並んで延設され、これと同様に上体 2 4 の左  
側部から 2 個の脚（第 2 脚 # 2、第 4 脚 # 4）が前後方向に並んで延設  
5 されている。各脚 # 1 ~ # 4 の先端部には、フリージョイントである球  
関節 1 2 を介して円盤状の接地部位 1 0 が取り付けられている。以降、  
接地部位 1 0 を各脚 # 1 ~ # 4 毎に区別する必要があるときは、それぞ  
れを第 1 接地部位、第 2 接地部位、第 3 接地部位、第 4 接地部位という。

各接地部位 1 0 は、その中心点を球関節 1 2 の中心点に一致させて該  
10 球関節 1 2 に係合されており、該接地部位 1 0 の中心点（厳密には球関  
節 1 2）には、床反力モーメント（床反力のモーメント成分）が作用し  
ないようになっている。すなわち接地部位 1 0 の中心点の床反力モーメ  
ント（実床反力モーメント）は常に 0 となる。

図示のロボット 1 では、各脚 # 1 ~ # 4 は、ロボット 1 の上体 2 4 寄  
15 りの部分と中間部とにそれぞれ関節 1 4, 1 5 を備えると共に、各脚 #  
1 ~ # 4 の先端部近傍（球関節 1 2 と関節 1 4 とを連結するリンクの球  
関節 1 2 寄りの部分）に、バネなどの弾性部材から構成されたコンプラ  
イアンス機構 4 2 と、接地部位 1 0 に作用する実床反力を検出する床反  
力検出手段（外力検出手段）としての 6 軸力センサ 3 4 とが介装されて  
20 いる。図示の例では、関節 1 4 は 2 軸回りの回転が可能とされ、関節 1  
5 は 1 軸回りの回転が可能とされている。なお、コンプライアンス機構  
とし、接地部位の底面にスポンジやゴムなどの弾性体を設けてもよい。

各関節 1 4, 1 5 の変位動作（各軸回りの回転動作）は、図示を省略  
する電動モータなどのアクチュエータにより行なわれる。そして、各関  
25 節 1 4, 1 5 の実際の変位量（各軸回りの回転角）である実関節変位が、  
図示しないロータリエンコーダ等のセンサにより検出される。なお、6



軸力センサ 34 は、3 軸方向の並進力と 3 軸回りのモーメントとを検出可能なものであるが、第 1 参考例のロボット 1 では、前記したように接地部位 10 の中心点に実床反力モーメントが作用しない。従って、6 軸力センサ 34 の代わりに、3 軸方向の並進力を検出する 3 軸力センサ、  
5   あるいは、実床反力の並進力の鉛直成分だけを検出する力センサを用いてもよい。

上体 24 には、マイクロコンピュータやアクチュエータ駆動回路等を含む電子回路ユニットから構成された制御装置 50 と、上体 24 の姿勢を検出する姿勢センサ 36 と、図示しない電源（2 次電池、キャパシタ  
10   など）とが内蔵されている。姿勢センサ 36 は、例えば加速度センサとジャイロセンサとから構成されている。なお、本明細書では、「姿勢」は一般的には空間的な向きを意味する（但し、ロボットの全体の「姿勢」は、ロボットの運動の瞬時値を意味する）。そして、本参考例では、姿勢センサ 36 は、上体 24 の姿勢のうち、例えば鉛直方向に対するピ  
15   ッチ方向およびロール方向の姿勢傾斜（傾き角）を検出する。すなわち、姿勢センサ 36 は上体 24 の実姿勢傾斜を検出する実姿勢検出手段として機能する。

なお、ロボット 1 の上体 24 のヨー方向の姿勢（回転角）も制御するような場合には、上体 24 のヨー方向の回転角も（換言すれば上体 24  
20   の 3 軸方向の姿勢を）姿勢センサ 36 で検出するようにしてもよい。

図 2 は、前記制御装置 50 の機能的構成および動作を示すブロック図である。なお、図 2 では、図 1 のロボット 1 から、制御装置 50、姿勢センサ 36 および 6 軸力センサ 34 を除いたものを実ロボット 1 と称している。ここで、前記図 1 に示したように、ロボット 1 のおおよそ前方  
25   方向を X 軸、おおよそ左横方向を Y 軸、上方向を Z 軸とした、床に固定された所定の座標系（X Y Z 座標系）を「支持脚座標系」または「グロー

「グローバル座標系」と呼ぶ。以降、特に断らない限り、位置、姿勢、並進力およびモーメントはこの支持脚座標系（グローバル座標系）の座標成分の組によって表現されるものとする。支持脚座標系（グローバル座標系）の原点は、定常的に単一の点に固定されている必要はなく、ロボット1  
5 の移動途中で床に対する原点位置を変更してもよい。例えば、ロボット1の所定の脚が着地する毎に支持脚座標系（グローバル座標系）の原点位置を変更してもよい。

図2に示すように、制御装置50は、その機能的構成要素（機能的手段）として、歩容生成装置100、目標床反力分配器102、ロボット  
10 幾何学モデル（逆キネマティクス演算部）110、階層型コンプライアンス動作決定部114、変位コントローラ112、実床反力検出器108、姿勢偏差演算部103、および姿勢安定化制御演算部104を備えている。以下に、制御装置50のこれらの要素の概要を説明する。

歩容生成装置100は、目標歩容決定手段あるいは目標運動決定手段  
15 としての機能を持ち、ロボット1の動作を規定する目標歩容を生成（決定）して出力する。目標歩容は、本参考例では、ロボットの目標運動の軌道（ロボットの各部位の目標位置姿勢の時系列）と目標床反力の軌道（ロボットが床から受ける反力の作用点の目標位置とその作用点にかかる並進力およびモーメントの目標値との組の時系列）とから構成される。  
20 なお、本明細書では、「軌道」は、時系列パターン（時間的変化のパターン）を意味する。

歩容生成装置100が出力する目標運動の軌道は、ロボット1の各接地部位10の位置および姿勢の目標値の軌道である目標接地部位軌道と、  
ロボット1の上体24の位置および姿勢の目標値の軌道である目標上体  
25 位置姿勢軌道とから構成される。なお、後述する第1参考例のように、腕や頭部に係る関節を備えるロボットにおける歩容生成装置は、腕や頭

部の目標位置姿勢軌道も目標運動の構成要素として決定して出力する。

また、歩容生成装置 100 が出力する目標床反力の軌道は、本参考例では、ロボット 1 の全床反力中心点の目標位置の軌道である目標全床反力中心点軌道と、この目標全床反力中心点を作用点とする全床反力の目標値の軌道である目標全床反力軌道とから構成される。本参考例では、目標全床反力中心点軌道は、ZMP の目標位置の軌道である目標 ZMP 軌道と同一とされている。

各接地部位 10 の位置は、該接地部位 10 のある代表点の位置であり、その代表点は、例えば、各接地部位 10 の中心点（球関節 12 の中心点）の、該接地部位 10 の接地面（底面）への鉛直方向の投影点あるいは該接地部位 10 の中心点（球関節 12 の中心点）とされている。以降、各接地部位 10 の代表点の位置を単に接地部位位置と呼ぶ。この接地部位位置の目標値の軌道（目標接地部位位置軌道）が歩容生成装置 100 により決定される前記目標接地部位軌道に含まれる。

ここで、本参考例のロボット 1 では、各接地部位 10 はフリージョイントである球関節 12 に係合されているので、各接地部位 10 の姿勢を制御することはできない。このため、本参考例では、歩容生成装置 100 は、実際には各接地部位 10 の目標姿勢の軌道を生成しない（生成する必要がない）。従って、本参考例では、前記目標接地部位軌道は、目標接地部位位置軌道と同じものを意味する。

但し、後述する第 1 実施形態のロボットのように、各接地部位が各脚の先端部にその姿勢を制御可能に取り付けられている場合（各脚の先端部にアクチュエータにより動作可能な関節を介して接地部位が取り付けられている場合）には、各接地部位の目標姿勢の軌道も、前記目標接地部位軌道に含まれるべきものである。本明細書では、このような場合も一般的に考慮するために、しばしば「接地部位位置姿勢」という用語を

用いるが、それは、本参考例では、実質的には「接地部位位置」のことを意味する。

図3(a)～図3(c)および図4(a)～図4(c)を参照して、目標接地部位軌道(目標接地部位位置軌道)および目標全床反力中心点軌道をより具体的に説明する。第1参考例では、脚#1～#4のうち、第1脚#1および第4脚#4の組を支持脚、第2脚#2および第3脚#3の組を遊脚とする時期と、全ての脚#1～#4を支持脚とする時期と、第1脚#1および第4脚#4の組を遊脚、第2脚#2および第3脚#3の組を支持脚とする時期とを順番に繰り返しつつ、遊脚となる脚の組を離床させて空中で移動させた後、所望の位置に着地させるという脚#1～#4の運動を行なうことによりロボット1の移動を行なうようにしている。支持脚は、接地してロボット1の自重を支える脚(0でない床反力を作用させるべき脚)であり、遊脚は支持脚でない脚である。

図3(a)～図3(c)および図4(a)～図4(c)は、上記の如くロボット1を移動させるときの各脚#1～#4の先端の目標接地部位位置(詳しくは水平面(XY平面)上での位置)を時系列的に順番に(時刻 $t_1 \sim t_6$ の順に)示したものである。これらの図中の参照符号Q1～Q4に対応する三角形が、それぞれ第1～第4接地部位10の目標接地部位位置(第1～第4接地部位10の前記代表点の水平面(XY平面)上での位置)を示している。

補足すると、図3および図4中の参照符号Q1～Q4を付した三角形は、正確には、各接地部位10に係る後述の目標ノード床反力中心点(目標接地部位床反力中心点)の位置を示すものである。ただし、本参考例では、各接地部位10の代表点を前記した如く設定しているので、第1～第4接地部位10のそれぞれの目標接地部位位置(代表点の目標位置)は、後述する目標ノード床反力中心点 $Q_n$ ( $n=1,2,3,4$ )のそれぞれ

れの位置に一致するか、もしくは、該目標ノード床反力中心点  $Q_n$  ( $n=1,2,3,4$ ) のそれぞれの位置と一定の位置関係を有する (水平面 (XY平面) 上での位置は一致する)。このため、図3および図4中の参照符号  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$ ,  $Q_4$  に対応する三角形は、第1～第4接地部位 10のそれぞれの後述の目標ノード床反力中心点を表すと同時に、第1～第4接地部位10のそれぞれの位置を表している。

図3(a)は、第2脚#2および第3脚#3の組を支持脚とし、遊脚としての第1脚#1および第4脚#4の組を着地させる瞬間 (時刻  $t_1$ ) での各接地部位10の目標接地部位位置を示し、図3(b)は、全ての脚#1～#4が支持脚となっている状態の時刻  $t_2$  での目標接地部位位置を示し、図3(c)は、第1脚#1および第4脚#4の組を支持脚とし、遊脚としての第2脚#2および第3脚#3の組を離床させる (空中に持ち上げる) 直前の時刻  $t_3$  での目標接地部位位置を示している。また、図4(a)は、第1脚#1および第4脚#4の組を支持脚とし、遊脚としての第2脚#2および第3脚#3の組を空中に持ち上げた状態の時刻  $t_4$  での目標接地部位位置を示し、図4(b)は、第1脚#1および第4脚#4の組を支持脚とし、遊脚としての第2脚#2および第3脚#3の組を着地させた瞬間 (時刻  $t_5$ ) での目標接地部位位置を示し、図4(c)は、第2脚#2および第3脚#3の組を支持脚とし、遊脚としての第1脚#1および第4脚#4の組を離床させる直前の時刻  $t_6$  での目標接地部位位置を示している。なお、図4(a)では遊脚である第2脚#2および第3脚#3の目標接地部位位置を破線の三角形で示している。補足すると、遊脚の接地部位10の鉛直方向 (Z軸方向) の位置の軌道は、床面から所定の高さまで上昇した後、下降して、再び着地するように決定される。

これらの図3および図4における点Pは、目標全床反力中心点 (目標

ZMP)を示している。目標全床反力中心点軌道は、ZMPの存在可能範囲(いわゆる支持多角形に相当する床面上の領域)内で該範囲の境界に近づきすぎない位置(例えばZMPの存在可能範囲のほぼ中央位置)に存在しつつ、連続的に移動するように決定される。第1参考例では、

5 2つの脚#1, #4または#2, #3が支持脚となるときには(図3(a), (c)、図4(a)~(c)を参照)、それらの脚の接地部位10, 10の代表点を結ぶ線分上で、その線分の端点に近づき過ぎないように目標全床反力中心点が設定される。また、全ての脚#1~#4が支持脚となるときには(図3(b)を参照)、全ての接地部位10の代表点を  
10 頂角とする多角形内で、該多角形の境界に近づき過ぎないように目標全床反力中心点が設定される。図5(d)は、このように決定された目標全床反力中心点(目標ZMP)の位置のX軸方向(ロボット1の進行方向)の成分ZMP<sub>x</sub>の軌道を例示したグラフである。なお、図5(a)~(c)は後述の重みの設定例を示すグラフである。

15 また、歩容生成装置100が決定する目標上体位置姿勢軌道は、少なくとも、ロボット1の目標運動によって発生する慣性力とロボット1に作用する重力との合力が目標ZMPまわりに作用するモーメントの水平成分が0になるようにロボット1の動力学モデルなどを使用して決定される。なお、「上体位置」は、上体24のある代表点の位置である。

20 また、歩容生成装置100が決定する目標全床反力は、目標全床反力中心点に作用する並進力およびモーメントの目標値から構成され、本参考例では、ロボット1の目標運動によって発生する慣性力とロボット1に作用する重力との合力に目標全床反力中心点で釣り合うように決定される。なお、目標全床反力中心点(目標ZMP)まわりの目標全床反力  
25 のモーメント水平成分は0である。補足すると、目標全床反力中心点に作用する並進力およびモーメントの全ての成分を目標値として決定する

必要はない。例えばロボット1の鉛直軸まわりの姿勢もしくは床反力を制御しない場合には、目標全床反力のモーメントの鉛直軸まわりの成分（Z軸方向成分）を決定する必要はない。

5     なお、歩容生成装置100が決定する目標接地部位軌道（目標接地部位位置軌道）は、後述する階層型コンプライアンス動作決定部114にて修正される。

10     前記目標床反力分配器102は、ロボット1の第1～第4接地部位10をツリー構造状にグループ分けし（すなわち階層化し）、階層化された各グループに、ツリー構造のノードを対応させる。したがって、以下の説明において、ノードをグループに置き換えて表現しても構わない。  
各ノードは、1つ以上の接地部位10から構成されるグループである。

15     第1参考例においては、図6に示す如く接地部位10が階層化される。すなわち、第n接地部位10（ $n=1,2,3,4$ ）を第nノードに対応させ、第1ノードと第4ノードとを子ノードとして持つノードを第14ノードとし、第2ノードと第3ノードとを子ノードとして持つノードを第23ノードとし、第14ノードと第23ノードとを子ノードとして持つノードを第1423ノードとする。従って、第1～第4ノードは、それぞれ第1、第2、第3、第4接地部位10から成るノード、第14ノードは、第1接地部位10と第4接地部位10とから成るノード、第23ノード  
20     は、第2接地部位10と第3接地部位10とから成るノード、第1423ノードは全ての接地部位10から成るノードである。

25     ツリー構造における一般的な呼び方に従い、子ノードを持たないノードを葉ノードと呼び、親ノードを持たないノードを根ノードと呼ぶ。したがって、第nノード（ $n=1,2,3,4$ ）は葉ノード、第1423ノードは根ノードである。なお、本明細書では、ノードを区別するために、葉ノードには、それに対応する接地部位（もしくは脚）と同じ番号（1,2,3,...）

## 20

を割り付け、葉ノード以外のノードには、葉ノードより大きい番号を割り付けることとする。また、葉ノードおよび根ノード以外のノードを中間ノードと呼ぶ。第1参考例では、中間ノードは第14ノード、第23ノードである。

- 5 目標床反力分配器102には、歩容生成装置100で決定された目標歩容のうち、目標全床反力中心点軌道、目標全床反力軌道および目標接地部位軌道とが入力される。なお、歩容生成装置100が目標歩容を決定するために使用した歩容パラメータ（ロボット1の遊脚の接地部位10の着地予定位置、着地予定時刻など）も目標床反力分配器102に入力してもよい。そして、目標床反力分配器102は、これらの入力を基に、上記のように階層化された各ノードの床反力中心点の目標位置である目標ノード床反力中心点（目標第 $n$ ノード床反力中心点） $Q_n$ （ $n=1,2,3,4,14,23,1423$ ）と、根ノードを除く各ノードの重み $W_n$ （ $n=1,2,3,4,14,23$ ）とを決定する。ただし、各重み $W_n$ は1以下の非負
- 10
- 15 の値とする。

目標ノード床反力中心点  $Q_n$ （ $n=1,2,3,4,14,23$ ）および重み  $W_n$ （ $n=1,2,3,4,14,23$ ）の決定手法を図3（b）、図5および図7などを参照しつつ以下に詳説する。図3（b）には、同図示の状態における  $Q_n$  と  $W_n$  との関係が示され、図5（a）～（c）には  $W_n$  の設定例が示され、図7には重みと目標ノード床反力中心点との関係が示されている。

20

根ノードである第1423ノードの目標ノード床反力中心点（目標第1423ノード床反力中心点） $Q_{1423}$ は、目標全床反力中心点（図3および図4中の点P）と同一に決定される（ $P=Q_{1423}$ ）。従って、以降の説明では、目標第1423ノード床反力中心点を示す符号として、多くの場合、目標全床反力中心点と同じ参照符号Pを用いる。

25

また、根ノードの重み  $W_{1423}$  は、表現の統一性を保つために、便宜



上「1」に設定される。

第  $n$  接地部位 10 ( $n=1,2,3,4$ ) の目標床反力中心点 (目標第  $n$  接地部位床反力中心点とも言う) は、本参考例においては、常に第  $n$  接地部位 10 の中心点 (球関節 12 の中心点) に設定される。そして、第  $n$  接地部位 10 に対応する葉ノードの目標ノード床反力中心点  $Q_n$  ( $n=1,2,3,4$ ) は、第  $n$  接地部位 10 の目標床反力中心点と同一に決定される。従って、目標ノード床反力中心点  $Q_n$  ( $n=1,2,3,4$ ) も常に第  $n$  接地部位 10 の中心点 (この点の位置は該第  $n$  接地部位 10 の目標接地部位位置から一義的に定まる) に設定される。このように決定した葉ノードの目標ノード床反力中心点  $Q_n$  ( $n=1,2,3,4$ ) の位置は、第  $n$  接地部位 10 の目標接地部位位置から一義的に定まる。逆に言えば、葉ノードの目標ノード床反力中心点  $Q_n$  ( $n=1,2,3,4$ ) は、第  $n$  接地部位 10 の目標位置を規定するものとなる。なお、以降の説明では、葉ノードの目標ノード床反力中心点を目標接地部位床反力中心点ということもある。また、各目標接地部位軌道は、連続的に変化するように設定されるので、 $Q_n$  ( $n=1,2,3,4$ ) も連続的に変化するものとなる。

補足すると、本参考例では、第  $n$  葉ノード (第  $n$  接地部位 10) の目標床反力中心点  $Q_n$  ( $n=1,2,3,4$ ) を第  $n$  接地部位 10 の中心点に設定したが、接地部位の姿勢を制御できるロボットでは、各葉ノード (各接地部位) の目標床反力中心点は、例えば、その葉ノードに対応する接地部位の目標位置姿勢により定まる該接地部位の接地面 (目標歩容で想定される床面との接触面) 内に設定すればよい。

以降、一般に、任意の 2 つの点  $A$ ,  $B$  を結ぶ線分またはその長さを  $AB$  というように表す。また、演算子「 $*$ 」は、スカラーとスカラーとの組もしくはスカラーとベクトルとの組に対しては、乗算を意味し、ベクトルとベクトルとの組に対しては、外積 (ベクトル積) を意味する。

根ノード以外の各ノードの重み  $W_n$  ( $n=1,2,3,4,14,23$ ) と各中間ノードの目標ノード床反力中心点  $Q_{14}$ ,  $Q_{23}$  とは、目標第 14 ノード床反力中心点  $Q_{14}$  が、 $Q_1Q_{14} : Q_{14}Q_4 = W_4 : W_1 = (1-W_1) : W_1$  という関係式を満たす線分  $Q_1Q_4$  の内分点、目標第 23 ノード床反力中心点  $Q_{23}$  が、 $Q_2Q_{23} : Q_{23}Q_3 = W_3 : W_2 = (1-W_2) : W_2$  という関係を満たす線分  $Q_2Q_3$  の内分点、目標第 1423 ノード床反力中心点  $P$  (=目標全床反力中心点) が、 $Q_{14}P : PQ_{23} = W_{23} : W_{14} = (1-W_{14}) : W_{14}$  を満たす線分  $Q_{14}Q_{23}$  の内分点となるように決定される。

言い換えると、少なくとも次式 1, 2, 3 を満足するように、 $Q_{14}$ ,  $Q_{23}$ ,  $W_n$  ( $n=1,2,3,4,14,23$ ) が決定される。なお、これらの式 1 ~ 3 中の  $Q_n$  ( $n=1,2,3,4,14,23$ ) は、その点の位置 (位置ベクトル) を意味している。

$$Q_{14} = Q_1 * W_1 + Q_4 * W_4, \quad W_1 + W_4 = 1 \quad \dots \text{式 1}$$

$$Q_{23} = Q_2 * W_2 + Q_3 * W_3, \quad W_2 + W_3 = 1 \quad \dots \text{式 2}$$

$$P = Q_{14} * W_{14} + Q_{23} * W_{23}, \quad W_{14} + W_{23} = 1 \quad \dots \text{式 3}$$

$W_n$  ( $n=1,2,3,4,14,23$ ) が 1 以下の非負の値であることから、上式 1, 2, 3 の右辺における  $Q_n$  ( $n=1,2,3,4,14,23$ ) の係数 (重み) は、すべて非負の値となる。

上式 1 ~ 3 は、子ノードを持つ各ノード (すなわち葉ノードでない各ノード) の目標ノード床反力中心点の位置が、所定の非負の重みを用いて、そのノードの子ノードの目標ノード床反力中心点の位置の重み付き平均の位置に設定されることを意味する。言い換えると、前記図 3 (b) および図 7 に示す如く、子ノードを持つ各ノードの目標床ノード反力中心点  $Q_n$  ( $n=14,23,1423$ ) は、そのノードのすべての子ノードの

目標ノード床反力中心点の内分点に設定される。図7は、各ノードの目標ノード床反力中心点  $Q_n$  ( $n=1,2,3,4,14,23,1423$ ) と重み  $W_n$  ( $n=1,2,3,4,14,23$ ) との関係を示す図である。なお、図3(b)中の  $L_{23}$ ,  $L_{14}$ ,  $L_{1423}$  はそれぞれ線分  $Q_2Q_3$ ,  $Q_1Q_4$ ,  $Q_{23}Q_{14}$  の長さで

5. ある。

補足すると、 $Q_1 \sim Q_4$  および  $P (=Q_{1423})$  は前記した如く決定されるので、 $W_n$  ( $n=1,2,3,4,14,23$ ) を決定すると、式1~3を満たす  $Q_{14}$ ,  $Q_{23}$  は一義的に定まり、逆に、 $Q_{14}$ ,  $Q_{23}$  を決定すると、式1~3を満たす  $W_n$  ( $n=1,2,3,4,14,23$ ) は一義的に定まる。従って、重み  $W_n$

10 ( $n=1,2,3,4,14,23$ ) を決定した上で、前記式1~3に基づいて中間ノードの目標ノード床反力中心点  $Q_{14}$ ,  $Q_{23}$  を決定しても、中間ノードの目標ノード床反力中心点  $Q_{14}$ ,  $Q_{23}$  を決定した上で、前記式1~3に基づいて重み  $W_n$  ( $n=1,2,3,4,14,23$ ) を決定しても、どちらでもよい。

中間ノードの目標ノード床反力中心点  $Q_{14}$ ,  $Q_{23}$  は、図3(a)~  
15 図3(c) および図4(a)~図4(c) に時系列的に示したように、各接地部位10の移動に伴って移動する。この時の重み  $W_{14} (=1 - W_{23})$ ,  $W_1 (=1 - W_4)$ ,  $W_3 (=1 - W_2)$  は、それぞれ例えば前記図5(a)~(c)のグラフで示す如く連続的に変化するように決定される。第  $n$  ノード ( $n=1,2,3,4$ ) の  $Q_n$  の軌道および重み  $W_n$  が連続的に  
20 変化するように設定されるので、目標ノード床反力中心点  $Q_{14}$ ,  $Q_{23}$  も連続的に移動するように決定される。つまり、すべての目標ノード床反力中心点(目標第  $n$  ノード床反力中心点 ( $n=1,2,3,4,14,23,1423$ )) は、連続的に移動するように設定される。

目標床反力分配器102は、上記のように決定した各ノードの目標ノード床反力中心点を出力する。なお、根ノードの目標床反力中心点は、  
25 歩容生成装置100が決定する目標全床反力中心点と同じであるので、

目標床反力分配器 102 から出力する必要はない。

目標床反力分配器 102 は、さらに、各ノードの目標床反力中心点に作用する床反力の目標値である目標ノード床反力を決定して出力する。出力する目標ノード床反力には、少なくとも葉ノードである第  $n$  ノード ( $n=1,2,3,4$ ) の目標ノード床反力中心点  $Q_n$  に作用する目標ノード床反力 (目標第  $n$  ノード床反力)、すなわち、各接地部位 10 の目標床反力が含まれる。この目標ノード床反力は、後述する階層型コンプライアンス動作決定部 114 の処理で実行される、各脚 #1 ~ #4 のコンプライアンス機構 42 など (図 1 参照) のたわみ補償 (より詳しくはコンプライアンス機構 42 および各脚のリンク機構のたわみによる各接地部位 10 の位置ずれの補償) 等のために必要である。補足すると、ロボット 1 が、各脚 #1 ~ #4 の先端部以外にもコンプライアンス機構を備える場合には、コンプライアンス機構の変形を求めるために、目標第 14 ノード床反力、目標第 23 ノード床反力 (中間ノードの目標ノード床反力) も決定して出力することが望ましい。

一般的に、各ノードの目標ノード床反力中心点に作用する目標床反力 (目標ノード床反力) は、目標全床反力と各ノードの重みとから決定すればよい。具体的には、任意のノードの目標床反力は、そのノードの重みとそのノードのすべての先祖ノードの重みとの積に目標全床反力を乗じることによって決定すればよい。すなわち、次式 4a (または式 4b) によって目標第  $n$  ノード床反力が算出される。

目標第  $n$  ノード床反力

= 第  $n$  ノード重み

\* 第  $n$  ノードのすべての先祖ノードの重みの積

\* 目標全床反力

…式 4a

目標第  $n$  ノード床反力

= 第  $n$  ノード重み

\* 第  $n$  ノードのすべての先祖ノード（根ノードを除く）の重みの積

\* 目標全床反力

…式 4 b

5

あるいは、葉ノードでない任意の第  $n$  ノードの目標床反力が、第  $n$  ノードのすべての子ノードの目標床反力の和（合力）に一致し、かつ、根ノードの目標床反力が目標全床反力に一致するように、目標各ノード床反力が決定される。この関係を示したものが図 8 である。

10 すなわち、第  $n$  ノードの目標床反力である目標第  $n$  ノード床反力を  $F_n$  ( $n=1,2,3,4,14,23,1423$ )、目標全床反力を  $F_{totalref}$  で表すと、 $F_n$  は、図 8 中に示す式によって、 $F_{totalref}$  と、重み  $W_n$  ( $n=1,2,3,4,14,23$ ) とから決定される。図 8 中の式は前記式 4 a または 4 b と等価である。

15 以上のごとく各ノードの目標床反力中心点（目標ノード床反力中心点）と各ノードの目標床反力（目標ノード床反力）とを決定することは、第  $n$  ノードのすべての子ノードの目標床反力の合力が目標第  $n$  ノード床反力中心点まわりに発生するモーメントの水平成分が 0 となるように各ノードの目標床反力中心点と目標床反力とを決定していることになる。

20 従って、目標ノード床反力のモーメント水平成分は、いずれのノードについても 0 である。

なお、接地していない（非接地状態の）接地部位 10 の目標床反力（接地していない接地部位 10 に対応する葉ノードの目標ノード床反力）が 0 となるように、各目標ノード床反力中心点  $Q_n$

25 ( $n=1,2,3,4,14,23$ )、各重み  $W_n$  ( $n=1,2,3,4,14,23$ ) および各目標ノード床反力  $F_n$  ( $n=1,2,3,4,14,23$ ) の組が決定される。従って、第 1 参考例

では、図5(a)に示したように、第1接地部位10および第4接地部位10が遊脚となって離床する時期（該遊脚の接地部位10が空中を移動する時期）では、重み  $W_{14}$  が0（ $W_{23}=1$ ）とされ、また、第2接地部位10および第3接地部位10が遊脚となって離床する時期では、  
5 重み  $W_{23}$  が0（ $W_{14}=1$ ）とされる。このように、子ノードを持つ中間ノードの重みは、その中間ノードに葉ノードとして属する全ての接地部位が接地していない時期では0に設定される。逆に言えば、中間ノードの重みは、その中間ノードに属するいずれかの接地部位が接地している時期（厳密にはいずれかの接地部位に0でない床反力が作用している  
10 時期）では0には設定されない。

補足すると、第1参考例では、中間ノード  $Q_{14}$  に属する第1接地部位10および第4接地部位10のいずれか一方のみを非接地状態とする時期を有しないため、これらの接地部位10、10に対応する重み  $W_1$ ,  $W_4$  は0または1となる時期を持たないものとなっている。ただし、第  
15 1接地部位10および第4接地部位10のいずれか一方のみが非接地状態となる時期を有するように、目標接地部位軌道を決定するようにした場合には、その時期で非接地状態となる接地部位10に対応する重みを0に設定し、且つ、接地状態となる接地部位10に対応する重みを1に設定するようにすればよい。この場合、その時期における中間ノード  
20  $Q_{14}$  の重みは、0で無い値に設定される。中間ノード  $Q_{23}$ 、並びにこれに属する葉ノードである第2接地部位10および第3接地部位10に係る重みについても同様である。一般的に言えば、子ノードを持つノードの重みは、そのノードに属する接地部位のいずれかが接地状態であるときには、0で無い値に設定され、そのノードに属する接地部位の全て  
25 が非接地状態となるときに、0に設定される。

上記のように求めた各目標ノード床反力は連続的に変化するので、ロ

ボット 1 の衝撃の少ない移動（歩行）を実現するために適している。

以上の如く、第 1 参考例では、各目標ノード床反力中心点  $Q_n$  ( $n=1,2,3,4,14,23,1423$ )、各重み  $W_n$  ( $n=1,2,3,4,14,23$ ) および各目標各床反力  $F_n$  ( $n=1,2,3,4,14,23,1423$ ) は、目標床反力分配器 102 によって次の条件 A) ~ G) を満たすように決定される。

A) 各葉ノードの目標ノード床反力中心点  $Q_n$  ( $n=1,2,3,4$ ) は、該葉ノードに対応する接地部位 10 の中心点に一致する。より一般的には、 $Q_n$  ( $n=1,2,3,4$ ) は、目標歩容（目標接地部位軌道などの目標運動）に応じて決定される。補足すると、例えば各接地部位 10 の目標床反力中心点を歩容生成装置 100 で決定するようにしてもよく、その場合には、歩容生成装置 100 が決定する目標床反力を基に、目標ノード床反力中心点  $Q_n$  ( $n=1,2,3,4$ ) を決定すればよい。

B) 根ノードの目標ノード床反力中心点は、目標全床反力中心点  $P$  に一致する。

C) 根ノードを除く各ノードの目標ノード床反力中心点  $Q_n$  ( $n=1,2,3,4,14,23$ ) と重み  $W_n$  ( $n=1,2,3,4,14,23$ ) とは、前記式 1 ~ 3 の関係式を満たす。換言すれば、子ノードを持つ任意の第  $n$  ノード ( $n=14,23,1423$ ) の目標ノード床反力中心点  $Q_n$  は、その第  $n$  ノードの各子ノードの目標ノード床反力中心点の重み付き平均の点となる。

D) 子ノードを持つ任意の第  $n$  ノード ( $n=14,23,1423$ ) の目標ノード床反力  $F_n$  は、該第  $n$  ノードのすべての子ノードの目標ノード床反力の和（合力）に一致し、且つ、根ノード（第 1423 ノード）の目標ノード床反力  $F_{1423}$  は目標全床反力  $F_{totalref}$  に一致する。換言すれば、第  $n$  ノード ( $n=1,2,3,4,14,23,1423$ ) の目標床反力  $F_n$  および重み  $W_n$  が図 8 中の関係式を満たす。

E) 接地していない接地部位 10 に対応する葉ノードの目標ノード床反

力は0となる。

F)  $Q_n$ ,  $W_n$ ,  $F_n$  ( $n=1,2,3,4,14,23,1423$ ) は連続的に変化する。

G) 非接地状態の接地部位10に対応する葉ノードの重み、または、その葉ノードの祖先ノードのいずれか1つの重みは0とされる。

- 5     なお、目標ノード床反力を決定する際に、前記のごとく重みを基に決定する代わりに、各目標ノード床反力中心点を基に決定しても良い。すなわち、前記A)～C)の条件を満たすように各目標ノード床反力中心点を決定した上で、その目標ノード床反力中心点と、前記式1～3とを基に、各重みを決定し、その決定した重みを用いて前記式4により目標
- 10    各ノード床反力を決定するようにしても良い。

- 図2の説明に戻って、前記姿勢偏差演算部103は、ロボット1に目標上体姿勢に対する実上体姿勢の偏差を算出して出力するものである。本参考例では、該姿勢偏差演算部103には、前記姿勢センサ36で検出された上体24の鉛直方向に対する傾き角（以下、実上体姿勢傾斜と
- 15    いう）と、歩容生成装置100で決定された目標上体位置姿勢（詳しくは、目標上体姿勢のうちの鉛直方向に対する傾き角。以下、目標上体姿勢傾斜という）とが入力され、これらの偏差 $\theta_{berr}$ （実上体姿勢傾斜－目標上体姿勢傾斜。以下、上体姿勢傾斜偏差 $\theta_{berr}$ という）が算出される。算出する $\theta_{berr}$ は、X軸まわり成分（ロール方向成分） $\theta_{berrx}$
- 20    と、Y軸まわり成分（ピッチ方向成分） $\theta_{berry}$ とから構成される。なお、目標上体姿勢傾斜が例えば定常的に0であるような場合には、 $\theta_{berr}$ ＝実上体姿勢傾斜であるので、姿勢センサ36の検出値（実上体姿勢傾斜）をそのまま、上体姿勢傾斜偏差 $\theta_{berr}$ として出力すればよい。

- 前記姿勢安定化制御演算部104は、一般的に言えば、前記上体姿勢
- 25    傾斜偏差など、ロボット1に備えられたセンサの情報に基づいて検出または推定されるロボット1の状態に応じてロボット1の姿勢を安定化す



るための全床反力の補償量（目標全床反力の補正量）である補償全床反力を算出するものである。

ロボット 1 の姿勢を長期的に安定化させるためには、ロボット 1 の上体 24 などの所定の部位の実際の位置姿勢を望ましい位置姿勢に復元させるために必要な並進力とモーメントとを求め、これを目標全床反力中心点（目標 ZMP）を作用点として付加的に発生させる必要がある。この付加的な並進力とモーメントとを補償全床反力という。また、補償全床反力のモーメント成分を「補償全床反力モーメント Mdmd」（詳しくは目標全床反力中心点（目標 ZMP）まわりの補償全床反力モーメント Mdmd）と呼ぶ。

本参考例では、姿勢安定化制御演算部 104 は、実上体姿勢傾斜を目標上体姿勢傾斜に復元する（近づける）ように補償全床反力モーメント Mdmd を算出する。このために、姿勢安定化制御演算部 104 には、前記姿勢偏差演算部 103 で求められた上体姿勢傾斜偏差  $\theta_{berr}$  ( $\theta_{berrx}$ ,  $\theta_{berry}$ ) が入力される。

姿勢安定化制御演算部 104 は、入力された上体姿勢傾斜偏差  $\theta_{berr}$  を基に、前記補償全床反力モーメント Mdmd を算出する。算出する Mdmd は、X 軸まわり成分 Mdmdx と、Y 軸まわり成分 Mdmdy とから構成される。

Mdmdx および Mdmdy は、具体的には、例えば次式 5, 6 のフィードバック制御則（ここでは PD 制御則）によって決定される。すなわち、Mdmdx および Mdmdy は、上体姿勢傾斜偏差  $\theta_{berrx}$ ,  $\theta_{berry}$  を 0 に近づけるように決定される。

$$Mdmdx = -K_{thx} * \theta_{berrx} - K_{wx} * (d\theta_{berrx}/dt) \quad \cdots \text{式 5}$$

$$Mdmdy = -K_{thy} * \theta_{berry} - K_{wy} * (d\theta_{berry}/dt) \quad \cdots \text{式 6}$$

ここで、 $K_{thx}$ ,  $K_{thy}$ ,  $K_{wx}$  および  $K_{wy}$  は、所定のゲインである。  
また、 $(d\theta_{berrx}/dt)$ ,  $(d\theta_{berry}/dt)$  は、それぞれ上体姿勢傾斜偏差  $\theta_{berrx}$ ,  $\theta_{berry}$  の時間微分値である。

- 5 本参考例においては、補償全床反力モーメント  $M_{dmd}$  の Z 軸まわり成分（ヨー方向成分） $M_{dmdz}$  を用いないので、 $M_{dmdz}$  の決定を行なわないが、ロボット 1 のスピン（鉛直軸回りの滑り）を防止したりするために  $M_{dmdz}$  を決定するようにしても良い。 $M_{dmdz}$  の決定法に関しては、本願出願人が先に提案した特願 2003-185613 号や特願  
10 2003-185930 号にて詳細に説明されている。また、例えばロボット 1 の実際の重心の位置を目標歩容での重心の位置に復元するために、その重心の位置偏差に応じて補償全床反力の並進力を決定するようにすることも可能である。

- 前記床反力検出器 108 は、各脚 # 1 ~ # 4 の 6 軸力センサ 34 の出力  
15 力を基に、実際のロボット 1 の各接地部位 10 に作用する床反力の実値である実床反力（すなわち葉ノードの実床反力（実ノード床反力））を検出する。さらに、床反力検出器 108 は、ロボット 1 の各関節 14, 15 に備えたエンコーダ等のセンサ（図示しない）によって検出される各脚 # 1 ~ # 4 の各関節 14, 15 の実関節変位（各関節 14, 15 の  
20 各回転軸まわりの実回転角）に基づき、上体 24 に固定された座標系に対する各接地部位 10 の相対位置姿勢（第 1 参考例では相対位置）を算出する。なお、このとき、実関節変位の代わりに、各関節 14, 15 の変位指令値（回転角指令値）である関節変位指令を用いたり、あるいは、  
25 実関節変位と関節変位指令との両者を使用してもよい。そして、算出した各接地部位 10 の相対位置姿勢を基に、各脚 # 1 ~ # 4 毎の 6 軸力センサ 34 の検出値（これは 6 軸力センサ 34 などに固定されたローカル

座標系での値である)を座標変換して、上体24に固定された座標系で表現された実床反力を算出した後、これを支持脚座標系(グローバル座標系)で表現された実床反力に変換する。支持脚座標系への座標変換には、姿勢センサ36の検出値、あるいは目標上体姿勢傾斜を用いればよい。補足すると、第1参考例のロボット1では、前記したように接地部位10の中心点に床反力モーメントが作用しないので、各接地部位10の実床反力のうちのモーメント成分を検出する必要はない。この場合、前記したように6軸力センサ34の代わりに、3軸力センサを用いて、実床反力の3軸方向の並進力成分を検出したり、1軸床反力センサを用いて実床反力の並進力鉛直成分だけを検出するようにしてもよい。

前記ロボット幾何学モデル(逆キネマティクス演算部)110は、各接地部位位置姿勢の最終的な目標軌道(これは後述の階層型コンプライアンス動作決定部114により決定される)と目標上体位置姿勢などを基に、逆キネマティクスの演算によって、それらを満足するロボット1の各関節14, 15の変位(回転角)の指令値である各関節変位指令を算出する。本参考例では、逆キネマティクスの演算の解の式をあらかじめ求めておき、その式に目標上体位置姿勢と各接地部位の最終的な目標位置を代入するだけで各関節変位指令を算出するようにした。すなわち、ロボット幾何学モデル110は、歩容生成装置100で決定された目標上体位置姿勢軌道と階層型コンプライアンス動作決定部114で後述する如く修正された修正目標接地部位軌道(機構変形補償入り修正目標接地部位軌道)とが入力され、それらの入力値から逆キネマティクスの演算によって、各脚#1~#4の各関節14, 15の関節変位指令を算出する。

25     なお、後述する第1実施形態のように腕関節や首関節など脚関節以外の関節があるロボットの場合には、手や頭部などの上体に対する相対位

## 3 2

置姿勢を基に、逆キネマティクスの演算によって、脚関節以外の関節の変位が決定される。

前記変位コントローラ 1 1 2 は、関節制御手段としての機能を持ち、ロボット 1 の各関節 1 4, 1 5 の実関節変位（検出値）と、ロボット幾何学モデル（逆キネマティクス演算部） 1 1 0 で算出された関節変位指令とが入力され、該関節変位指令を目標値として、この目標値に実関節変位を追従させるように各関節 1 4, 1 5 のアクチュエータ（図示しない）を制御（フィードバック制御）する。

階層型コンプライアンス動作決定部 1 1 4 は、目標全床反力と補償全床反力との合力に実全床反力を近づけるように目標接地部位軌道を修正し、その修正後の目標接地部位軌道である機構変形補償付き修正目標接地部位位置姿勢軌道を出力するものである。なお、本参考例では、各接地部位 1 0 の姿勢は制御できないので、機構変形補償付き修正目標接地部位位置姿勢軌道は、実際には、機構変形補償付き修正目標接地部位位置軌道である。

階層型コンプライアンス動作決定部 1 1 4 は、一般的には、以下の 3 つの要求をできるだけ満足させるように各接地部位 1 0 の目標接地部位軌道を修正するものである。

要求 1) ロボット 1 の位置姿勢を安定化するために、実全床反力を姿勢安定化制御演算部 1 0 4 が出力する補償全床反力（モーメント  $M_{dmd}$ ）と目標全床反力との合力に追従させる。なお、第 1 参考例ではロボット 1 の上体 2 4 の姿勢傾斜（鉛直方向に対する傾き）を安定化するため、目標全床反力中心点まわりの実全床反力モーメントの水平成分を補償全床反力モーメント  $M_{dmd}$  の水平成分  $M_{dmdx}$ ,  $M_{dmdy}$  に追従させる。補足すると、目標全床反力中心点まわりの目標全床反力モーメント

ントの水平成分は0であるので、これと  $M_{dmd}$  との合力は、 $M_{dmd}$  に一致する。

要求2) 接地しているべき複数の接地部位10に対し、その一部の接地部位10に実床反力が集中し、それ以外のある一部の接地部位10の実床反力が減少し過ぎ、その実床反力が減少した接地部位10の接地性が極端に低下しないように、できる限り葉ノードでない各ノードの目標床反力中心点まわりの実床反力モーメントの絶対値を小さくする。なお、第1参考例では、第14ノード、第23ノード、第1423ノードの目標床反力中心点まわりの実床反力モーメントの絶対値をできる限り小さくする。

要求3) 接地しているべき各接地部位10の接地性を確保するように、すなわち各接地部位10におけるローカルな接地圧分布(実床反力の分布)が偏って、該接地部位10の局所的な接地性が低下しないように、できるかぎり各接地部位10(各葉ノード)の目標床反力中心点まわりの実床反力モーメントの絶対値を小さくする。但し、第1参考例のロボット1では、各接地部位10の目標床反力中心点まわりの実床反力モーメントは常に0となるので、この要求3)は考慮する必要はない。

尚、一般に、要求1)~3)の全て、あるいは要求1)、2)を完全に満足することはできない。例えば実全床反力を補償全床反力と目標全床反力との合力に一致させながら各接地部位10の目標床反力中心点まわりの実床反力モーメントを0にすることが、物理的に不可能な場合が多い。従って、階層型コンプライアンス動作決定部114は、一般には、要求1)~3)、あるいは要求1)、2)をできるだけ満たしつつ、ある妥協点で、各接地部位10の目標接地部位軌道を修正することとなる。

以上が制御装置50の各機能的手段(機能的構成要素)の概要である。補足すると、前記階層型コンプライアンス動作決定部114、姿勢安

## 34

定化制御演算部 104 およびロボット幾何学モデル（逆キネマティクス演算部） 110 は、本発明におけるノード動作制御手段に相当するものである。

次に、図 9 のフローチャートを参照しつつ、制御装置 50 の全体的な動作（演算処理）をより詳細に説明する。図 9 は制御装置 50 のメインルーチン処理を示すフローチャート（構造化フローチャート）である。尚、図 9 の左端には、該当する処理を行う制御装置 50 の構成要素を示す。

10 先ず、S10 において制御装置 50 の初期化が行なわれた後、S12 を経て S14 に進み、制御装置 50 の演算処理は、該制御装置 50 の制御周期毎のタイマ割り込みを待つ状態となる。制御周期は例えば 50 ms である。

続いて S16 に進んで歩容の切り替わり目か否か判断し、その判断結果が NO であるときは後述の S22 に進む。また、S16 の判断結果が YES であるときは S18 に進んで時刻  $t$  を 0 に初期化した後、S20 に進んで歩容パラメータを設定する。本参考例では、例えばロボット 1 のある所定の脚（例えば #1）が離床してから次に離床するまで（もしくは着地してから次に着地するまで）の所定期間分の目標歩容を単位として、その所定期間分の目標歩容を規定するパラメータ（目標歩容を決定するためのアルゴリズムで使用するパラメータ）である歩容パラメータが S20 で設定される。そして、S16 でいうところの「歩容の切り替わり目」は、上記所定期間分の目標歩容の切り替わり目のことである。なお、目標歩容の切り替わり目の判断は、時刻や、上記所定の脚の 6 軸力センサ 34 の検出値などを基に行えばよい。

25 S20 で設定される歩容パラメータは、ロボット 1 の目標運動軌道（詳しくは目標接地部位軌道および目標上体位置姿勢軌道）を規定する

運動パラメータと、目標床反力軌道（詳しくは目標全床反力軌道および目標全床反力中心点軌道）を規定する床反力パラメータとから構成される。補足すると、ロボット1の目標運動が決まれば、その目標運動によって発生する慣性力とロボット1に作用する重力との合力の符号を反転  
5 させたものを目標全床反力とすればよいので、床反力パラメータは、目標全床反力中心点軌道のみを規定するものでもよい。また、目標接地部位軌道（より一般的には目標上体位置姿勢以外の目標運動のパラメータ）と目標全床反力中心点とを決定した上で、ロボット1の動力学モデルを使用し、ロボット1の目標上体位置姿勢を含む目標運動が発生する  
10 慣性力とロボット1に作用する重力との合力が目標全床反力中心点（目標ZMP）まわりに発生するモーメントの水平成分が0になるように、目標上体位置姿勢を決定するような場合には、運動パラメータには、目標上体位置姿勢軌道を規定するパラメータが含まれていなくてもよい。

続いてS22に進み、上記歩容パラメータを基に、目標歩容の瞬時値  
15 を決定する。ここで「瞬時値」は制御周期ごとの値を意味し、目標歩容瞬時値は、目標上体位置姿勢、目標接地部位位置（目標接地部位軌道の瞬時値）、目標全床反力、および目標全床反力中心点位置（目標ZMP位置）の瞬時値から構成される。なお、本参考例では、接地部位10の姿勢を制御できないので、各接地部位10の目標姿勢の瞬時値は決定し  
20 ない。各接地部位の姿勢を制御できる場合には、前記歩容パラメータに各接地部位の目標姿勢を規定するパラメータを含めておき、そのパラメータを基に各接地部位の目標姿勢の瞬時値を決定すればよい。

上記S14～S22の処理は、前記歩容生成装置100により実行される処理である。

25 続いてS24に進んで、各ノードの重み  $W_n(n=1,2,3,4,14,23)$  と各ノードの目標床反力中心点（目標ノード床反力中心点）

$Q_n(n=1,2,3,4,14,23)$ とが求められる。この処理は目標床反力分配器 102 によって前記した如く実行される処理である。

続いて S 26 に進んで、目標ノード床反力（少なくとも各接地部位 10（各葉ノード）の目標床反力を含む）が求められる。第 1 参考例では、  
5 各葉ノードの目標ノード床反力（各目標接地部位床反力）が求められる。  
この S 26 処理も、目標床反力分配器 102 によって前記した如く実行される処理である。なお、前述の通り、各脚 # 1 ~ # 4 の先端部以外にもコンプライアンス機構を設けた場合には、さらに葉ノードでない各中間ノードの目標床反力も求めた方がよい。補足すると、目標ノード床反  
10 力のモーメント水平成分は 0 である。

続いて S 28 に進み、姿勢センサ 36 などの出力から前記実上体姿勢傾斜などのロボット 1 の状態を検出する。第 1 参考例では、前記姿勢偏差演算部 103 によって、姿勢センサ 36 による実上体姿勢傾斜の検出値が取り込まれ、その検出値と目標上体位置姿勢のうちの目標上体姿勢  
15 傾斜（現在時刻の瞬時値）とから、上体姿勢傾斜偏差  $\theta_{berr}$  が算出される。

続いて S 30 に進み、S 28 で検出したロボット 1 の状態などからロボット 1 の姿勢を安定化するための補償全床反力を求める。第 1 参考例では、前記姿勢安定化制御演算部 104 によって、前記上体姿勢傾斜偏差  $\theta_{berr}$  から、目標全床反力中心点（目標 ZMP）まわりの補償全床反力モーメント  $M_{dmd}$  の水平成分  $M_{dmdx}$ ,  $M_{dmdy}$  が前記式 5 および  
20 式 6 に従って算出される。

続いて S 32 に進んで各接地部位 10 の実床反力を検出する。これは前記実床反力検出器 108 によって実行される処理であり、前記の如く、  
25 6 軸力センサ 34 によって検出された各接地部位 10 毎の実床反力を支持脚座標系（グローバル座標系）に変換したものが求められる。以降、



各接地部位 10 の実床反力を実接地部位床反力ということがある。

続いて S 3 4 から S 3 8 まで、前記階層型コンプライアンス動作決定部 1 1 4 の処理が実行される。

以下、しばらくの間、これらの S 3 4 ~ S 3 8 の処理を具体的に説明  
5 する前に、階層型コンプライアンス動作決定部 1 1 4 の全体的な処理を説明する。なお、この説明は、理解の便宜上、主に前記図 3 (b) に示す状態 (ロボット 1 の全ての脚 # 1 ~ # 4 が支持脚となっている状態) を例にとって行なう。

階層型コンプライアンス動作決定部 1 1 4 は、目標床反力分配器 1 0  
10 2 で決定された各葉ノードの目標ノード床反力などを基に、葉ノードを除く各ノードの目標ノード床反力の並進力成分とモーメント成分 (より詳しくは目標ノード床反力中心点を作用点とする並進力成分とモーメント成分) とを決定する。

図 3 (b) の状態における各ノードの目標床反力 (各目標ノード床反力) の並進力成分を、例示的に図 10 に示す。この図において、ベクトル  $F_{n\_ref}$  ( $n=1,2,3,4,14,23$ ) が目標第  $n$  ノード床反力の並進力成分を表している。また、 $F_{totalref}$  は目標全床反力 (= 目標第 1423 ノード床反力) の並進力成分を表す。前記図 8 に示したように、葉ノードでない任意の第  $n$  ノード ( $n=14,23,1423$ ) の目標第  $n$  ノード床反力は、第  $n$  ノードのすべての子ノードの目標ノード床反力の合力に決定される。従って、 $F_{14ref} = F_{1ref} + F_{4ref}$ 、 $F_{23ref} = F_{2ref} + F_{3ref}$ 、 $F_{totalref} (= F_{1423ref}) = F_{14ref} + F_{23ref}$  である。階層型コンプライアンス動作決定部 1 1 4 は、目標床反力分配器 1 0 2 で決定された各葉ノード (各接地部位 10) の目標ノード床反力の並進力成分  $F_{n\_ref}(n=1,2,3,4)$  から、  
20 上記の如く、各中間ノードの目標ノード床反力の並進力成分  $F_{14ref}$  ( $= F_{1ref} + F_{4ref}$ )、 $F_{23ref}$  ( $= F_{2ref} + F_{3ref}$ ) を求める。なお、

$F_{totalref}(=F_{1423ref})$ は、前記歩容生成装置 100 で決定された目標全床反力の並進力成分に設定される。

さらに、階層型コンプライアンス動作決定部 114 は、目標ノード床反力の並進力成分の場合と同様に、葉ノードを除く各ノードの目標ノード床反力の、目標ノード床反力中心点を作用点とするモーメント成分を決定する。ただし、この場合、目標ノード床反力中心点  $Q_n$  ( $n=1,2,3,4,14,23$ ) の定義より、目標第  $n$  ノード床反力のモーメント水平成分は、常に 0 に設定される。目標第 1423 ノード床反力 (= 目標全床反力) のモーメント水平成分も 0 に設定される。

- 10 本参考例のロボット 1 においては、各接地部位 10 は各脚 # 1 ~ # 4 の先端部の球関節 12 (フリースポイント) に係合しているため、各接地部位 10 (各葉ノード) に床反力モーメント (水平成分および鉛直成分) を発生させることができない。このため、階層型コンプライアンス動作決定部 114 では、各接地部位 10 (各葉ノード) の目標ノード床反力のモーメント鉛直成分も 0 に設定される。

- 15 葉ノードでないノードの目標ノード床反力モーメント鉛直成分は、ロボット 1 の目標運動に動力学的に釣り合うように決定すると、一般的には 0 ではない値も採り得るが、本参考例では、ロボット 1 の姿勢の鉛直軸まわりの回転 (ヨー方向の回転) に関する制御を行なわない。このため、本参考例では、葉ノードでないノードの目標ノード床反力のモーメントの鉛直成分の設定は省略する。このようなことから、図 3 (b) の状態における各目標ノード床反力のモーメント成分の図示は省略する。尚、ロボット 1 の姿勢の鉛直軸まわりの回転に関する制御を行なう場合には、各ノードの目標床反力モーメント鉛直成分も設定すべきである。

- 25 補足すると、葉ノードを含めた各ノードの目標ノード床反力の並進力成分およびモーメント成分の決定を、前記目標床反力分配器 102 で行

なうようにした場合には、その決定を階層型コンプライアンス動作決定部 114 で行なう必要はない。

また、階層型コンプライアンス動作決定部 114 は、各ノードの実床反力である実ノード床反力の並進力成分およびモーメント成分も決定する。

図 3 (b) の状態における各ノードの実床反力 (実ノード床反力) の並進力成分を、例示的に図 11 に示す。この図において、ベクトル  $F_{n\_act}$  ( $n=1,2,3,4,14,23$ ) が実第  $n$  ノード床反力の並進力成分を表している。また、 $F_{totalact}$  は実全床反力 (= 実第 1423 ノード床反力) の並進力成分を表す。一般に、葉ノードでない各ノードの実床反力の並進力成分は、そのノードのすべての子ノードの実床反力の並進力成分の合力とする。従って、第 14 ノード、第 23 ノードおよび第 1423 ノードの実床反力の並進力成分は  $F_{14act} = F_{1act} + F_{4act}$ 、 $F_{23act} = F_{2act} + F_{3act}$ 、 $F_{totalact} (= F_{1423act}) = F_{14act} + F_{23act}$  である。また、各葉ノードの実床反力の並進力成分  $F_{1act}$ 、 $F_{2act}$ 、 $F_{3act}$ 、 $F_{4act}$  は、前記実床反力検出器 108 で得られる各接地部位 10 の実床反力 (実接地部位床反力) の並進力成分である。なお、図 11 の点線で示したベクトルは、前記図 10 に示した目標ノード床反力の並進力成分である。階層型コンプライアンス動作決定部 114 は、上記のように、実床反力検出器 108 で得られた各接地部位 10 の実床反力から各ノードの実ノード床反力の並進力成分を決定する。

また、図 3 (b) の状態における各ノードの実床反力のモーメント成分を、例示的に図 12 に示す。この図において、ベクトル  $M_{n\_act}$  ( $n=14,23,1423$ ) は実第  $n$  ノード床反力のモーメント成分を表す。この場合、各ノードの実床反力の並進力成分と同様に、一般的には、葉ノードでないノードの実床反力のモーメント成分  $M_{14act}$ 、 $M_{23act}$ 、

M1423act (=Mtotalact) は、そのノードのすべての子ノードの実床反力の合力のモーメント成分（そのノードの目標床反力中心点 Q14, Q23, Q1423 を作用点とするモーメント成分）とする。

5 本参考例のロボット 1 においては、前記したように各接地部位 10（各葉ノード）に床反力モーメントを発生させることができないので、各葉ノードの実床反力（実接地部位床反力）のモーメント成分は、常に 0 になる。よって、各葉ノードの実ノード床反力のモーメント成分の図示は省略する。

10 葉ノードでないノードの実床反力モーメント成分（本参考例では、M14act, M23act, M1423act）は、一般的に、0 にならない。例えば目標第 14 ノード床反力中心点 Q14 のまわりには、一般には、第 1 接地部位 10（第 1 ノード）および第 4 接地部位 10（第 4 ノード）の実床反力の並進力成分の水平成分によってモーメントが発生する。ただし、本参考例のロボット 1 においては、脚の先端部にフリージョイントである球関節 12 を備えているので、M14act の線分 Q1Q4 と同方向の成分、  
15 M23act の線分 Q2Q3 と同方向の成分は 0 となる。

尚、各脚の先端部の関節にアクチュエータを備えたロボット（各脚の先端部の接地部位の姿勢を制御可能なロボット）においては、該ロボットの姿勢の鉛直軸まわり回転に関する制御を行なわない場合でも、本願  
20 出願人が先に提案した特開平 10-277969 号公報の実施例に示すごとく、各接地部位の目標床反力モーメント水平成分も設定し、また、各接地部位の実床反力モーメントも検出する。そして、各接地部位の実床反力モーメント水平成分を目標床反力モーメント水平成分に近づけるように、あるいは、各接地部位の実床反力モーメントを、目標床反力モーメント水平成分とその接地部位補償床反力モーメントとの和（ベクトル和）に近づけるように、各接地部位の姿勢の補正動作を行うべきであ  
25

る。

階層型コンプライアンス動作決定部 114 の処理をより詳細に説明する。この場合、図 3 (b) に示す状態で、ロボット 1 の上体 24 の姿勢が左後ろ側に倒れそうな状態となり、姿勢安定化制御演算部 104 が決定した補償全床反力モーメント  $M_{dmd}$  が、図 13 のようになっている状況を想定する。

ロボット 1 の上体 24 の姿勢（鉛直方向に対する傾き）を復元させる（目標上体姿勢における傾きに復元させる）ためには、目標全床反力中心点（目標 ZMP）まわりの実全床反力モーメントの水平成分を、目標全床反力モーメント  $M_{totalref}$ （= $M_{1423ref}$ ）と補償全床反力モーメント  $M_{dmd}$  との和の水平成分に追従させれば良い。

一方、目標全床反力中心点（目標 ZMP）では目標全床反力モーメント  $M_{totalref}$  の水平成分は 0 である。従って、ロボット 1 の上体 24 の前後左右の姿勢（傾き）を復元させるためには、目標全床反力中心点（目標 ZMP）まわりの実全床反力モーメントの水平成分を、 $M_{dmd}$  の水平成分（ $M_{dmdx}$ ,  $M_{dmdy}$ ）に追従させれば良い。また、本参考例では、各接地部位 10 の目標床反力中心点まわりの実床反力モーメントは 0 である。

そこで、第 1 参考例における階層型コンプライアンス動作決定部 114 は、前記した要求 1)、2) の要求をできる限り満足するよう歩容生成装置 100 で決定した各接地部位 10 の目標接地部位位置（特に高さ方向の位置）を修正する。

この修正を行なうために、階層型コンプライアンス動作決定部 114 は、補償角というものを決定する。この補償角は、接地部位 10 の位置の間の相対関係のある点まわりの回転操作によって修正する（本参考例では上下方向で修正する）ための操作量（回転量）である。本参考例に

においては、その補償角としては、第 14 ノード補償角  $\theta_{14}$ 、第 23 ノード補償角  $\theta_{23}$ 、第 1423 ノード補償角  $\theta_{1423}$  がある。すなわち、葉ノード以外のノードの補償角である。そして、階層型コンプライアンス動作決定部 114 は、これらの補償角  $\theta_{14}$ 、 $\theta_{23}$ 、 $\theta_{1423}$  を基に、目標第 5  
第  $n$  ノード床反力中心点  $Q_n$  ( $n=1,2,3,4,14,23$ ) を修正してなる目標第  $n$  ノード床反力中心点  $Q_n'$  を決定する。

図 15 に示すように、第 14 ノード補償角  $\theta_{14}$  は、線分  $Q_1Q_4$  と線分  $Q_1'Q_4'$  とが成す角度、第 23 ノード補償角  $\theta_{23}$  は、線分  $Q_2Q_3$  と線分  $Q_2'Q_3'$  とが成す角度である。また、図 16 に示すように、第 1423  
10 ノード補償角  $\theta_{1423}$  は、線分  $Q_{14}Q_{23}$  と線分  $Q_{14}'Q_{23}'$  とが成す角度である。これらのノード補償角  $\theta_{14}$ 、 $\theta_{23}$ 、 $\theta_{1423}$  の決定手法は後述する。

図 15 および図 16 を参照して、補償角  $\theta_{14}$ 、 $\theta_{23}$ 、 $\theta_{1423}$  を基にした目標第  $n$  ノード床反力中心点  $Q_n$  ( $n=1,2,3,4,14,23$ ) の修正は次の  
15 ように行なわれる。

図 15 を参照して、目標第 1 ノード床反力中心点  $Q_1$  (第 1 接地部位 10 の目標床反力中心点) と目標第 4 ノード床反力中心点  $Q_4$  (第 2 接地部位 10 の目標床反力中心点) とを含みかつ水平面と垂直な平面の法線ベクトル  $V_{14}$  を求める。 $V_{14}$  の大きさは 1 とする。目標第 1 ノード  
20 床反力中心点  $Q_1$  の座標 (位置) を、目標第 14 ノード床反力中心点  $Q_{14}$  を回転中心として法線ベクトル  $V_{14}$  まわり ( $Q_{14}$  を通って  $V_{14}$  に平行な軸まわり) に、前記第 14 ノード補償角  $\theta_{14}$  だけ回転移動する。この回転移動による  $Q_1$  の移動後の点を  $Q_1'$  とする。同様に、目標第 4 ノード床反力中心点  $Q_4$  の座標 (位置) を、目標第 14 ノード床反力中心点を回転中心として法線ベクトル  $V_{14}$  まわりに第 14 ノード補償角  $\theta_{14}$   
25 だけ回転移動する。この回転移動による  $Q_4$  の移動後の点を  $Q_4'$  とす

## 43

る。換言すれば、線分  $Q1Q4$  をその内分点である  $Q14$  を回転中心として  $V14$  まわりに  $\theta 14$  だけ回転させて得られる線分の端点を  $Q1'$ ,  $Q4'$  とする。従って、第 14 ノード補償角  $\theta 14$  は、第 14 ノードの目標床反力中心点  $Q14$  の位置を動かさずに、第 14 ノードの子ノードである第 1 ノードおよび第 4 ノードのそれぞれの目標床反力中心点  $Q1$ ,  $Q4$  の位置の相対関係を動かすための操作量である。

また、目標第 2 ノード床反力中心点  $Q2$  と目標第 3 ノード床反力中心点  $Q3$  を含みかつ水平面と垂直な平面の法線ベクトル  $V23$  を求める。 $V23$  の大きさは 1 とする。目標第 2 ノード床反力中心点  $Q2$  の座標（位置）を、目標第 23 ノード床反力中心点  $Q23$  を回転中心として法線ベクトル  $V23$  まわり（ $Q23$  を通って  $V23$  に平行な軸まわり）に、第 23 ノード補償角  $\theta 23$  だけ回転移動する。図 15 に示すように、この回転移動による  $Q2$  の移動後の点を  $Q2'$  とする。同様に、目標第 3 接地部位床反力中心点  $Q3$  の座標（位置）を、目標第 23 ノード床反力中心点を回転中心として法線ベクトル  $V23$  まわりに第 23 ノード補償角  $\theta 23$  だけ回転移動する。この回転移動による  $Q3$  の移動後の点を  $Q3'$  とする。換言すれば、線分  $Q2Q3$  をその内分点である  $Q23$  を回転中心として  $V23$  まわりに  $\theta 23$  だけ回転させて得られる線分の端点を  $Q2'$ ,  $Q3'$  とする。従って、第 23 ノード補償角  $\theta 23$  は、第 23 ノードの目標床反力中心点  $Q23$  の位置を動かさずに、第 23 ノードの子ノードである第 2 ノードおよび第 3 ノードのそれぞれの目標床反力中心点  $Q2$ ,  $Q3$  の位置の相対関係を動かすための操作量である。

次に、図 16 を参照して、目標第 14 ノード床反力中心点  $Q14$  と目標第 23 ノード床反力中心点  $Q23$  を含みかつ水平面と垂直な平面の法線ベクトル  $V1423$  を求める。 $V1423$  の大きさは 1 とする。目標第 14 ノード床反力中心点  $Q14$  の座標（位置）を、目標全床反力中心点  $P$

(=Q1423) を回転中心として法線ベクトル  $V_{1423}$  まわり (P を通って  $V_{1423}$  に平行な軸まわり) に、第 1423 補償角  $\theta_{1423}$  だけ回転移動する。この回転移動による Q14 の移動後の点を Q14' とする。同様に、目標第 23 接地部位床反力中心点 Q23 の座標 (位置) を、目標全床反力中心点 P を回転中心として法線ベクトル  $V_{1423}$  まわりに第 1423 補償角  $\theta_{1423}$  だけ回転移動する。この回転移動による Q23 の移動後の点を Q23' とする。換言すれば、線分 Q14Q23 をその内分点である P (=Q1423) を回転中心として  $V_{1423}$  まわりに  $\theta_{1423}$  だけ回転させて得られる線分の端点を Q14', Q23' とする。従って、第 1423 ノード補償角  $\theta_{1423}$  は、第 1423 ノードの目標床反力中心点 P の位置を動かさずに、第 1423 ノードの子ノードである第 14 ノードおよび第 23 ノードのそれぞれの目標床反力中心点 Q14, Q23 の位置の相対関係を動かすための操作量である。

なお、以降、一般に、始点が A、終点が B であるベクトルをベクトル  $A\_B$  と表記する。

次に、Q1' をベクトル  $Q_{14\_Q14'}$  だけ移動した点 Q1'' を求める。同様に、Q4' をベクトル  $Q_{14\_Q14'}$  だけ移動した点 Q4'' を求める。また、Q2' をベクトル  $Q_{23\_Q23'}$  だけ移動した点 Q2'' を求める。同様に、Q3' をベクトル  $Q_{23\_Q23'}$  だけ移動した点 Q3'' を求める。

次いで、第 n 接地部位 ( $n=1,2,3,4$ ) の目標接地部位位置をベクトル  $Q_n\_Q_n''$  だけ平行移動 (ほぼ上下移動) させる。これにより、各接地部位 10 の目標接地部位位置が修正されることとなる。補足すると、各ノードの目標床反力中心点と同様に、各葉ノードの位置を該葉ノードに対応する接地部位 10 の位置とし、子ノードを持つ各ノードの位置を、そのノードの全ての子ノードの位置の、前記の如く設定された重みを用いた重み付け平均の位置として定義したとき、上記のように、第 14 ノー



ド、第 23 ノード、第 1423 ノードのそれぞれの各子ノードの目標床反力中心点を補償角  $\theta_{14}$ 、 $\theta_{23}$ 、 $\theta_{1423}$  に応じて動かす処理は、第 14 ノード、第 23 ノード、第 1423 ノードのそれぞれの各子ノードの位置を補償角  $\theta_{14}$ 、 $\theta_{23}$ 、 $\theta_{1423}$  に応じて動かすことと同じことである。

- 5 尚、各脚の先端部にフリージョイントがないロボット（接地部位の姿勢を制御可能なロボット）においては、上記平行移動を各接地部位の姿勢（目標姿勢）を変えずに行なった後に、さらに、第  $n$  接地部位を  $Q_n$  を中心に、前後方向軸（ $X$  軸）まわりに、ある回転角  $\theta_{n\_x}$  だけ回転させると共に、左右方向軸（ $Y$  軸）まわりに、ある回転角  $\theta_{n\_y}$  だけ回転させる。これにより各接地部位の目標姿勢を修正する。この場合
- 10 の回転角  $\theta_n$ （ $\theta_{n\_x}$ 、 $\theta_{n\_y}$  からなる 2 次元量）を第  $n$  接地部位補償角と呼び、 $\theta_{n\_x}$  を第  $n$  接地部位補償角  $X$  成分、 $\theta_{n\_y}$  を第  $n$  接地部位補償角  $Y$  成分と呼ぶ。第  $n$  接地部位補償角  $\theta_n$  は、本願出願人が先に提案した特開平 10-277969 号公報に記載された手法に従って決定
- 15 すればよい。

- 補足すると、前記各ノード補償角は、そのノードの目標ノード床反力中心点を作用点として、そこに本来発生すべき目標床反力モーメント（その水平成分は 0）とノード補償床反力モーメント  $M_{n\_dmd}$  との合力が発生するように決定される。この場合、ノード補償床反力モーメント  $M_{n\_dmd}$  の基となる補償全床反力モーメント  $M_{dmd}$  は、実姿勢傾斜
- 20 偏差を 0 に近づけるように決定されたものである。従って、各ノード補償角は、目標全床反力中心点まわりの床反力モーメントを所望のモーメント（この場合は補償全床反力モーメント）に近づけつつ、実姿勢傾斜偏差を 0 に近づけるよう各接地部位 10 の相対位置関係进行操作するための
- 25 操作量として機能することとなる。

以上のごとく、各接地部位 10 の目標接地部位位置（詳しくはその位

置の相互の相対関係)を修正する処理が第1参考例における階層型のコンプライアンス動作である。このコンプライアンス動作では、子ノードを持つ各ノード毎に、そのノードの子孫ノードとなっている各接地部位10の目標接地部位位置の間の相対関係(相対的位置関係)の操作量(修正量)が各補償角 $\theta_{14}$ ,  $\theta_{23}$ ,  $\theta_{1423}$ に応じて定められ、それらの操作量(修正量)を合成することで、各接地部位10の目標接地部位位置の相互の相対関係が修正されることとなる。上記のように修正された目標接地部位位置姿勢を修正目標接地部位位置姿勢という。

このようなコンプライアンス動作では、一般に、前記補償角(補償動作量)が過大でなければ、各接地部位10の接地圧力分布は変わっても、接地領域(接地面の圧力が正の領域)は変わらない。このような場合には、補償角に比例して各接地部位10に装着されたコンプライアンス機構42などが変形し、その変形量に応じた各接地部位10の実床反力が発生する。この結果、補償角と補償角によって発生する実床反力の変化量との間の関係は、以下に示す良好な特性、すなわち線形特性を持つ。

特性1) 葉ノードでないノードの目標床反力中心点まわりの補償角だけを操作して各接地部位10の目標接地部位位置を移動させると、下がった接地部位10の実床反力の並進力成分が増加し、上がった接地部位10の実床反力の並進力成分が減少する。このとき、各接地部位10(各葉ノード)の修正された目標床反力中心点まわりの実床反力モーメントは、ほとんど変化しない。

特性2) 第n接地部位補償角だけを操作して第n接地部位の目標姿勢を回転させると、第n接地部位の目標床反力中心点に作用する実床反力のモーメント成分が変化し、並進力成分はあまり変化しない。

特性3) 葉ノードでないノードの目標床反力中心点まわりの補償角と第

n 接地部位補償角を同時に操作すると、各接地部位 10 の実床反力の変化量は、それぞれを単独に操作したときの変化量の和になる。

図 17 は、本参考例における階層型コンプライアンス動作決定部 114 の機能を示すブロック図であり、同図を参照して階層型コンプライアンス動作決定部 114 の処理をさらに詳細に説明する。

階層型コンプライアンス動作決定部 114 は、その機能的手段として、補償全床反力モーメント分配器 114a、補償角決定部 114b、114c、114d、修正目標接地部位位置姿勢算出部 114g、機構変形補償量算出部 114n、および機構変形補償入り修正目標接地部位位置姿勢算出部 114h を備えている。

補償全床反力モーメント分配器 114a は、前記補償全床反力モーメント  $M_{dmd}$  ( $M_{dmdx}$ ,  $M_{dmdy}$ ) を、第 1423 ノード補償床反力モーメント  $M_{1423dmd}$ 、第 14 ノード補償床反力モーメント  $M_{14dmd}$  および第 23 ノード補償床反力モーメント  $M_{23dmd}$  に分配するものである。

第 1423 ノード補償床反力モーメント  $M_{1423dmd}$  は、第 1423 補償角  $\theta_{1423}$  を操作することによって発生する各接地部位 10 (詳しくは第 1 ~ 第 4 接地部位) の床反力の並進力成分が、目標第 1423 ノード床反力中心点 (= 目標全床反力中心点 (目標 ZMP)) まわりに発生すべきモーメントの目標値である。

第 1423 ノード補償床反力モーメント  $M_{1423dmd}$  の前記ベクトル  $V_{1423}$  方向の成分 ( $V_{1423}$  方向の軸まわりの成分) を  $M_{1423dmdv}$  と記述する。尚、ベクトル  $V_{1423}$  は階層型コンプライアンス動作決定部 114 のコンプライアンス動作の全体的な説明で定義したベクトルである (図 16 参照)。  $V_{1423}$  に直交し、且つ鉛直方向にも直交するベクトルを  $U_{1423}$  とすると、本参考例では、第 1423 ノード補償床反力モーメント  $M_{1423dmd}$  の  $U_{1423}$  方向の成分 ( $U_{1423}$  方向の軸回りの成

分)  $M_{1423dmd}$  は 0 に設定される。これは、本参考例のロボット 1 では、第 1423 ノード補償角  $\theta_{1423}$  を操作しても、床反力モーメントの  $U_{1423}$  方向成分を発生することはできないからである。また、本参考例では鉛直軸まわりのロボット 1 の姿勢の回転を制御しないので、

5  $M_{1423dmd}$  の鉛直方向成分  $M_{1423dmdz}$  も 0 に設定される。

第 14 ノード補償床反力モーメント  $M_{14dmd}$  は、第 14 補償角  $\theta_{14}$  を操作することによって発生する各接地部位 10 (詳しくは第 1 および第 4 接地部位) の床反力の並進力成分が、目標第 14 ノード床反力中心点まわりに発生すべきモーメントの目標値である。

10 第 14 ノード補償床反力モーメント  $M_{14dmd}$  のベクトル  $V_{14}$  方向成分を  $M_{14dmdv}$  と記述する。尚、ベクトル  $V_{14}$  は階層型コンプライアンス動作決定部 114 のコンプライアンス動作の全体的な説明で定義したベクトルである (図 15 を参照)。  $V_{14}$  に直交し、且つ鉛直方向にも直交するベクトルを  $U_{14}$  とすると、本参考例では、第 14 ノード補償床反力モーメント  $M_{14dmd}$  の  $U_{14}$  方向成分  $M_{14dmdu}$  は 0 に設定される。これは、本参考例のロボット 1 では、第 14 ノード補償角  $\theta_{14}$  を操作しても、床反力モーメントの  $U_{14}$  方向成分を発生することはできないからである。なお、本参考例では、 $M_{14dmd}$  の鉛直方向成分も 0 に設定される。

20 第 23 ノード補償床反力モーメント  $M_{23dmd}$  は、第 23 補償角  $\theta_{23}$  を操作することによって発生する各接地部位 10 (詳しくは第 2 および第 3 接地部位) の床反力の並進力成分が、目標第 23 ノード床反力中心点まわりに発生すべきモーメントの目標値である。

25 第 23 ノード補償床反力モーメント  $M_{23dmd}$  のベクトル  $V_{23}$  方向成分を  $M_{23dmdv}$  と記述する。尚、ベクトル  $V_{23}$  は階層型コンプライアンス動作決定部 114 のコンプライアンス動作の全体的な説明で定義し

たベクトルである（図 15 を参照）。V23 に直交し、且つ鉛直方向にも直交するベクトルを U23 とすると、本参考例では、第 23 ノード補償床反力モーメント M23dmd の U23 方向成分 M23dmdu は 0 に設定される。これは、本参考例のロボット 1 では、第 23 ノード補償角  $\theta_{23}$  を操作し

5 ても、床反力モーメントの U23 方向成分を発生することはできないからである。なお、本参考例では、M23dmd の鉛直方向成分も 0 に設定される。

第 1423 ノード補償床反力モーメント M1423dmd、第 14 ノード補償床反力モーメント M14dmd および第 23 ノード補償床反力モーメント

10 M23dmd は、例えば次のように決定される。

任意の第 n ノードに対して、目標第 n ノード床反力中心点に第 n ノード補償床反力モーメントを加えることと等価になるように、第 n ノード補償床反力モーメントの水平成分を 0 にしたまま、目標第 n ノード床反力中心点を修正した場合における修正された目標第 n ノード床反力中心点位置を、修正目標第 n ノード床反力中心点位置と呼ぶ。

15

修正目標第 1423 ノード床反力中心点 Pmdfd (=Q1423mdfd)、修正目標第 14 ノード床反力中心点 Q14mdfd、修正目標第 23 ノード床反力中心点 Q23mdfd と各ノード補償床反力モーメントとの関係を次式 7 ~ 9 に示す。なお、目標第 1423 ノード床反力中心点 Q1423 は全床反力中心点 P と一致するので、修正目標第 1423 ノード床反力中心点 Pmdfd は、修正目標全床反力中心点ということもある。

20

$$M1423dmd = (Pmdfd - P) * Ftotalref \quad \cdots \text{式 7}$$

$$M14dmd = (Q14mdfd - Q14) * F14ref \quad \cdots \text{式 8}$$

25

$$M23dmd = (Q23mdfd - Q23) * F23ref \quad \cdots \text{式 9}$$

なお、式 7 中の  $(P_{mdfd} - P)$  など、2 つの点の差は、それらの点の位置ベクトルの差を意味する。また、 $F_{totalref}$ 、 $F_{14ref}$ 、 $F_{23ref}$  は図 10 に示したように、それぞれ第 1423 ノード、第 14 ノード、第 23 ノードの目標ノード床反力の並進力成分である。

- 5      ロボット 1 の接地性を高く保つためには、接地すべき接地部位 10 の床反力が 0 に近づき過ぎたり、負の値になろうとするように制御すべきではない。したがって、以下の条件 1) ~ 3) を満足すべきである。

修正ノード存在位置条件 1)

- 10       $P_{mdfd}$  は、全床反力中心点  $P$  から線分  $Q_{14}Q_{23}$  の端点に近づき過ぎず、かつ、線分  $Q_{14}Q_{23}$  上にあること。このように、修正目標第 1423 ノード床反力中心点（修正目標全床反力中心点） $P_{mdfd}$  が存在すべき範囲を、修正目標第 1423 ノード床反力中心点（修正目標全床反力中心点）の存在許容範囲と呼ぶ。

修正ノード存在位置条件 2)

- 15       $Q_{14mdfd}$  は、目標第 14 ノード床反力中心点  $Q_{14}$  から線分  $Q_1Q_4$  の端点に近づき過ぎず、かつ、線分  $Q_1Q_4$  上にあること。このように、修正目標第 14 ノード床反力中心点  $Q_{14mdfd}$  が存在すべき範囲を、修正目標第 14 ノード床反力中心点の存在許容範囲と呼ぶ。

修正ノード存在位置条件 3)

- 20       $Q_{23mdfd}$  は、目標第 23 ノード床反力中心点  $Q_{23}$  から線分  $Q_2Q_3$  の端点に近づき過ぎず、かつ、線分  $Q_2Q_3$  上にあること。このように、修正目標第 23 ノード床反力中心点  $Q_{23mdfd}$  が存在すべき範囲を、修正目標第 23 ノード床反力中心点の存在許容範囲と呼ぶ。

- 25      一方、ロボット 1 に実際に発生する姿勢復元力（上体 24 の傾きの、目標上体姿勢の傾きへの復元力）を適切にするためには、第 1423 ノー

ド補償床反力モーメント  $M_{1423dmd}$ 、第 14 ノード補償床反力モーメント  $M_{14dmd}$  および第 23 ノード補償床反力モーメント  $M_{23dmd}$  の合力が、補償全床反力モーメント  $M_{dmd}$  に略一致すべきである。すなわち、以下の式 10 を略満足すべきである。

5

$$M_{dmd} = M_{1423dmd} + M_{14dmd} + M_{23dmd} \quad \cdots \text{式 10}$$

そこで、本参考例では、第 1423 ノード補償床反力モーメント  $M_{1423dmd}$ 、第 14 ノード補償床反力モーメント  $M_{14dmd}$  および第 23  
10 ノード補償床反力モーメント  $M_{23dmd}$  は、それらと前記式 7、式 8、式 9 とによって定まる修正目標ノード床反力中心点  $P_{mdfd}$ ,  $Q_{14mdfd}$ ,  $Q_{23mdfd}$  の位置が前記修正ノード存在位置条件 1)、2) および 3) を満足している限りは、次式 11 ~ 13 によって決定される。

$$15 \quad M_{1423dmd} = \text{Mat}_{1423} * M_{dmd} * V_{1423} \quad \cdots \text{式 11}$$

$$M_{14dmd} = \text{Mat}_{14} * M_{dmd} * V_{14} \quad \cdots \text{式 12}$$

$$M_{23dmd} = \text{Mat}_{23} * M_{dmd} * V_{23} \quad \cdots \text{式 13}$$

ただし、 $\text{Mat}_{1423}$ 、 $\text{Mat}_{14}$ 、 $\text{Mat}_{23}$  はゲイン行列（第 3 要素が 0 である 1 行 3 列の行列）であり、これらは、式 11、式 12 および式 13 によって求められる  $M_{1423dmd}$ 、 $M_{14dmd}$ 、 $M_{23dmd}$  が、式 10 を満足するように設定される。

より厳密には、式 10、式 11、式 12 および式 13 からなる連立方程式が  $M_{dmd}$  の値にかかわらず恒等的に成立するように、ゲイン行列  
25  $\text{Mat}_{1423}$ 、 $\text{Mat}_{14}$ 、 $\text{Mat}_{23}$  が決定される。上記連立方程式が恒等的に成立するためのゲイン行列は一義的に決定されるわけではないので、例

例えば、修正ノード存在位置条件 1)、2) および 3) のいずれを特に重視するかによって、それに適切なゲイン行列を決定すれば良い。補足すると、各補償角  $\theta_{1423}$ ,  $\theta_{14}$ ,  $\theta_{23}$  を連続的に変化させるために、ゲイン行列は連続的に変化させることが望ましい。また、ロボット 1 の直立時であるか否かや、移動形態の違いなどによって、ゲイン行列の設定方針を変えても良い。

式 1 1、式 1 2 および式 1 3 にしたがって決定される第 1423 ノード補償床反力モーメント  $M_{1423dmd}$ 、第 14 ノード補償床反力モーメント  $M_{14dmd}$  および第 23 ノード補償床反力モーメント  $M_{23dmd}$  が修正ノード存在位置条件 1)、2) および 3) のいずれかを満足していない場合には、該条件 1)、2)、3) を満足するように、これらを修正する。より具体的には、修正目標第  $n$  ノード床反力中心点 ( $n=1423, 14, 23$ ) のうち、前記存在許容範囲を越えた修正目標ノード床反力中心点をその存在許容範囲の境界の点に設定し、その他の修正目標ノード床反力中心点を、式 1 1、式 1 2 および式 1 3 を可能な限り満足するように（左辺と右辺の差の絶対値がなるべく小さくなるように）決定する。ただし、一般的にフィードバック制御においてはフィードバック量が少々変わっても、制御対象の挙動が大きく変わることはないので、式 1 1、式 1 2 および式 1 3 を厳密あるいは強引に満足させる必要はない。

以上のごとく、補償全床反力モーメント分配器 1 1 4 a は、各ノード補償床反力モーメント  $M_{1423dmd}$ 、 $M_{14dmd}$ 、 $M_{23dmd}$  を決定する。図 1 4 には、このようにして決定された各ノード補償床反力モーメント  $M_{1423dmd}$ 、 $M_{14dmd}$ 、 $M_{23dmd}$  の例を示した。図中の  $M_{dmd}$  は、前記図 1 3 に示したものと同一である。

また、補償全床反力モーメント分配器 1 1 4 a は、各接地部位 1 0 の目標床反力（各葉ノードの目標ノード床反力）である目標接地部位床反



力、各ノード補償床反力モーメント  $M_{1423dmd}$ 、 $M_{14dmd}$ 、 $M_{23dmd}$  を基に、目標接地部位床反力に各ノード補償床反力モーメントを付加することによって修正される各接地部位 10 の目標床反力である修正目標接地部位床反力  $F_{n\_refmdfd}$  ( $n=1,2,3,4$ ) を求める。

- 5 この際、各接地部位 10 の目標床反力中心点（葉ノードの目標ノード床反力中心点） $Q_n$  ( $n=1,2,3,4$ )、目標全床反力中心点  $P$ 、各目標ノード床反力中心点  $Q_{14}$ 、 $Q_{23}$  と目標全床反力  $F_{totalref}$  とから、各目標ノード床反力を求める決定する手法と同様の手法によって、各接地部位 10 の目標床反力中心点  $Q_n$  ( $n=1,2,3,4$ )、修正全床反力中心点  $P_{mdfd}$ 、各修正目標ノード床反力中心点  $Q_{14mdfd}$ 、 $Q_{23mdfd}$  と目標全床反力  $F_{totalref}$  とから、修正目標接地部位床反力  $F_{n\_refmdfd}$  ( $n=1,2,3,4$ ) を求めればよい。すなわち、各接地部位 10 の目標床反力中心点  $Q_n$  ( $n=1,2,3,4$ )、修正全床反力中心点  $P_{mdfd}$ 、各修正目標ノード床反力中心点  $Q_{14mdfd}$ 、 $Q_{23mdfd}$  から、前記式 1 ～ 3 に基づいて各ノードの重みを決定し、その重みを用いて前記式 4 に基づいて修正目標接地部位床反力  $F_{n\_refmdfd}$  ( $n=1,2,3,4$ ) を求めればよい。

- 20 このことから明らかなように、子ノードを持つ第  $n$  ノードの目標第  $n$  ノード床反力中心点にノード補償床反力モーメントを発生させる（目標第  $n$  ノード床反力中心点に作用する目標床反力のモーメント成分を修正する）ということは、その第  $n$  ノードの子ノードの重みを修正することと同等である。

- 25 以上説明した補償全床反力モーメント分配器 114a の処理は、図 18 に示す機能ブロック図により表される。すなわち、目標ノード床反力中心点  $Q_n$  ( $n=1,2,3,4,14,23$ ) を基に、第 14 ノード、第 23 ノードおよび修正目標ノード床反力中心点  $Q_{n\_mdfd}$  ( $n=14,23,1423$ ) の存在許容範囲が前記修正ノード存在位置条件 1)、2)、3) に従って決定される。

また、補償全床反力モーメント  $M_{dmd}$  と、各ノードの目標床反力中心点  $Q_n(n=1,2,3,4,14,23,1423)$  および目標床反力  $F_{n\_ref}(n=1,2,3,4,14,23,1423)$  と、上記存在許容範囲とを基に、修正目標ノード床反力中心点  $Q_{n\_mdfd}(n=14,23,1423)$  およびノード補償床反力モーメント  $M_{n\_dmd}(n=14,23,1423)$  が決定される。また、修正目標ノード床反力中心点  $Q_{n\_mdfd}(n=14,23,1423)$  と、各接地部位 10 の目標床反力中心点  $Q_n(n=1,2,3,4)$  と、目標全床反力  $F_{totalref}$  とから、修正目標接地部位床反力  $F_{n\_refmdfd}(n=1,2,3,4)$  が求められる。

次に、前記補償角決定部 114b ~ 114d のうちの補償角決定部 10 ( $\theta_{1423}$  決定部) 114b の処理を図 19 のブロック図を参照して説明する。目標第 14 ノード床反力中心点  $Q_{14}$  に実第 1 ノード床反力と実第 4 ノード床反力との合力の並進力成分 ( $F_{1act} + F_{4act}$ ) が作用すると共に、目標第 23 ノード床反力中心点  $Q_{23}$  に実第 2 ノード床反力と実第 3 ノード床反力との合力の並進力成分 ( $F_{2act} + F_{3act}$ ) が作用した場合 15 に、それらの並進力成分が、目標全床反力中心点  $P$  (目標第 1423 ノード床反力中心点) のまわりに発生するモーメント  $M_{1423act}$  を、次式 14 により求める。

$$M_{1423act} = P\_Q_{14} * (F_{1act} + F_{4act}) + P\_Q_{23} * (F_{2act} + F_{3act})$$

20

…式 14

ここで、 $P\_Q_{14}$  は始点が  $P$ 、終点が  $Q_{14}$  のベクトル、 $P\_Q_{23}$  は始点が  $P$ 、終点が  $Q_{23}$  のベクトルである。

なお、式 14 の代わりに、次式 15 を用いて  $M_{1423act}$  を算出しても 25 実際上はほとんど問題がない。

$$M_{1423act} = P_{Q1} * F_{1act} + P_{Q2} * F_{2act} \\ + P_{Q3} * F_{3act} + P_{Q4} * F_{4act}$$

…式 1 5

5 式 1 5 の右辺は、第 1 ～第 4 ノード（各葉ノード）の実床反力の並進力成分  $F_{n\_act}(n=1,2,3,4)$  から目標全床反力中心点 P まわりに作用する実全床反力モーメント  $M_{totalact}$  を算出する式になっている。補足すると、式 1 4 は、目標全床反力中心点 P まわりに作用する実全床反力モーメント  $M_{totalact}$  から、目標第 14 ノード床反力中心点 Q14 まわりに作用する実床反力モーメントと目標第 23 ノード床反力中心点 Q23 まわりに作用する実床反力モーメントとを減じたものになっている。

一般的に、葉ノードである任意の第  $n$  ノードの実第  $n$  ノード床反力モーメント  $M_{n\_act}$  は、第  $n$  接地部位の実床反力モーメントとする。また、葉ノードでない任意の第  $n$  ノードに対し、そのすべての子ノードの床反力（ここでの子ノードの床反力は、厳密には、該子ノードの目標床反力中心点に作用する床反力）が目標第  $n$  ノード床反力中心点に作用するモーメントを、実第  $n$  ノード床反力モーメント  $M_{n\_act}$  と呼ぶ。

15 式 1 4 および式 1 5 のように、実第  $n$  ノード床反力モーメントは、子ノードの実床反力モーメントを含む定義と含まない定義とがあるがいずれを用いても構わない。特に、子ノードの実床反力モーメントの水平成分を制御するフィードバック制御の応答性が高ければ、子ノードの実床反力モーメントの水平成分はただちに 0 に収束するので、いずれの定義を用いても、第  $n$  ノードの実床反力の制御の挙動はあまり変らない。

以下に示す式 1 6 は、式 1 4 に対応した実第  $n$  ノード床反力モーメントの算出の一般式、式 1 7 は、式 1 5 に対応した実第  $n$  ノード床反力モーメントの算出の一般式である。ただし、式 1 6 および式 1 7 にお

いて、 $Q_n-Q_m$  は始点が  $Q_n$ 、終点が  $Q_m$  のベクトルである。また、葉ノードである第  $m$  ノードの実床反力モーメント  $M_{m\_act}$  は、実床反力検出器で検出された各接地部位の実床反力モーメントとする。

5  $m \in \{\text{第 } n \text{ ノードの子ノードの番号の集合}\}$  とすると

$$M_{n\_act} = \Sigma (Q_n - Q_m * F_{m\_act}) \quad \cdots \text{式 } 16$$

$m \in \{\text{第 } n \text{ ノードの子孫である葉ノードの番号の集合}\}$  であるとする

$$M_{n\_act} = \Sigma (Q_n - Q_m * F_{m\_act} + M_{m\_act}) \quad \cdots \text{式 } 17$$

10

なお、式 16、17 中の  $\Sigma$  は、 $m$  についての総和を意味する。補足すると、第 1 参考例では、葉ノード（各接地部位）の目標床反力中心点まわりの実床反力モーメントが 0 となることから、前記式 15 の右辺では、式 17 の  $M_{m\_act}$  の成分が含まれていない。接地部位の姿勢を制御可能なロボットでは、一般には、式 17 の  $M_{m\_act}$  は 0 にならない。

15

第 1423 ノード補償角  $\theta_{1423}$  は、一般的には、上記のように求められる  $M_{1423act}$  と先に補償全床反力モーメント分配器 114a で求められた第 1423 ノード補償床反力モーメント  $M_{1423dmd}$  との偏差 ( $M_{1423act} - M_{1423dmd}$ ) を 0 に近づけるようにフィードバック制御

20 則などにより決定すればよい。例えば該偏差に所定のゲイン行列（3 次の対角行列）を乗算することで  $\theta_{1423}$  を求めればよい。

20

但し、本参考例では、前記ベクトル  $V_{1423}$  の方向の軸回りの第 1423 ノード補償角  $\theta_{1423}$  を決定すればよいので、 $M_{1423act}$  のベクトル  $V_{1423}$  方向の成分  $M_{1423actv}$  と  $M_{1423dmd}$  のベクトル  $V_{1423}$  方向の成分  $M_{1423dmdv}$  との偏差に応じて  $\theta_{1423}$  を決定すればよい。そして、

25 この際、本参考例では、床反力の制御の応答性や安定性を高めるために、

25

M1423actv と M1423dmdv とをフィルタに通した上で、それらの偏差に応じて  $\theta_{1423}$  を決定することとした。

具体的には、上記の如く求めた M1423act のベクトル V1423 方向の成分 M1423actv を抽出する。これは、ベクトルの内積演算「 $\cdot$ 」を用いた次式 18 によって得られる。

$$M1423actv = M1423act \cdot V1423 \quad \cdots \text{式 18}$$

以上のように M1423actv を算出する処理が図 19 の参照符号 114k を付した演算部により実行される。

次に、上記 M1423actv をローパスフィルタ 114i に通し、M1423actvfilt を得る。また、前記第 1423 ノード補償床反力モーメント M1423dmd の V1423 方向の成分 M1423dmdv を補償フィルタ 114j に通し、M1423dmdvfilt を得る。なお、M1423dmdv は、前記式 18 と同様に、M1423dmd と V1423 との内積演算により求められる。そして、M1423dmdvfilt を M1423actvfilt から減じたものを、偏差モーメント V1423 方向成分 M1423errv として得る。

尚、前記補償フィルタ 114j は、制御系における M1423dmdv から実全床反力モーメントまでの伝達関数の周波数応答特性を改善するものである。

最後に次式 19 のフィードバック制御則（ここでは比例制御則）の演算によって前記第 1423 ノード補償角  $\theta_{1423}$  を得る。ここで K1423 は制御ゲインであり、通常、これは正の値に設定する。

$$\theta_{1423} = K1423 * M1423errv \quad \cdots \text{式 19}$$

すなわち、偏差モーメント  $V_{1423}$  方向成分  $M_{1423errv}$  に制御ゲイン  $K_{1423}$  を乗じることにより、第 1423 ノード補償角  $\theta_{1423}$  を得る。

次に、図 17 の補償角決定部 ( $\theta_{14}$  決定部) 114c の処理を、図 20 を参照して説明すると、目標第 1 ノード床反力中心点  $Q_1$  に実第 1 ノード床反力 (第 1 接地部位 10 の実床反力) の並進力成分  $F_{1act}$  が作用すると共に、目標第 4 ノード床反力中心点  $Q_4$  に実第 4 ノード床反力 (第 4 接地部位 10 の実床反力) の並進力成分  $F_{4act}$  と作用した場合にそれらの並進力成分が、目標第 14 ノード床反力中心点  $Q_{14}$  のまわりに発生するモーメント  $M_{14act}$  を、一般式である前記式 16 を用いて求める。

より具体的には、次式 20 により求める。

$$M_{14act} = Q_{14\_Q1} * F_{1act} + Q_{14\_Q4} * F_{4act} \quad \cdots \text{式 20}$$

ここで、 $Q_{14\_Q1}$  は始点が  $Q_{14}$ 、終点が  $Q_1$  のベクトル、 $Q_{14\_Q4}$  は始点が  $Q_{14}$ 、終点が  $Q_4$  のベクトルである。

また、式 20 の代わりに、次式 21 (前記式 17 を具体化した式) を用いても、前述の理由により、実際上はほとんど問題がない。

$$M_{14act} = Q_{14\_Q1} * F_{1act} + Q_{14\_Q4} * F_{4act} + M_{1act} + M_{4act} \quad \cdots \text{式 21}$$

ただし、 $M_{1act}$  は、実第 1 ノード床反力モーメント、 $M_{4act}$  は、実第 4 ノード床反力モーメントである。なお、第 1 参考例では各脚 #1 ~ #4 の先端部にフリージョイント (球関節 12) を備えているので、 $M_{1act}$ 、 $M_{4act}$  は 0 である。

式 2 1 は、第 14 ノードのすべての葉ノードの実床反力の合力が目標第 14 ノード床反力中心点まわりに作用するモーメントを算出する式になっている。尚、式 2 0 は、第 1 4 ノードのすべての葉ノードの実床反力の合力が目標第 1 4 床反力中心点まわりに作用するモーメントから、  
 5 実第 1 ノード床反力モーメントと実第 4 ノード床反力モーメントとを減じたものになっている。

第 14 ノード補償角  $\theta_{14}$  は、一般的には、上記のように求められる  $M_{14act}$  と先に補償全床反力モーメント分配器 1 1 4 a で求められた第 14 ノード補償床反力モーメント  $M_{1423dmd}$  との偏差 ( $M_{14act} -$   
 10  $M_{14dmd}$ ) を 0 に近づけるようにフィードバック制御則などにより求めればよい。

但し、本参考例では、 $\theta_{1423}$  の場合と同様の理由によって、 $M_{14act}$  の前記ベクトル  $V_{14}$  方向の成分  $M_{14actv}$  と  $M_{14dmd}$  のベクトル  $V_{14}$  方向の成分  $M_{14dmdv}$  とをそれぞれフィルタに通したものの偏差に応じて  $\theta_{14}$  を決定することとした。  
 15

すなわち、上記の如くもとめた  $M_{14act}$  のベクトル  $V_{14}$  方向成分  $M_{14actv}$  を抽出する。これは、ベクトルの内積演算を用いた次式 2 2 によって得られる。

$$20 \quad M_{14actv} = M_{14act} \cdot V_{14} \quad \dots \text{式 2 2}$$

以上のように  $M_{14actv}$  を算出する処理が図 2 0 の参照符号 1 1 4 k' を付した演算部により実行される。

次に、上記  $M_{14actv}$  をローパスフィルタ 1 1 4 i' に通し、  
 25  $M_{14actvfilt}$  を得る。また、前記第 14 ノード補償床反力モーメント  $M_{14dmd}$  の  $V_{14}$  方向の成分  $M_{14dmdv}$  を補償フィルタ 1 1 4 j' に通

し、 $M14dmdvfilt$  を得る。なお、 $M14dmdv$  は、 $M14dmd$  と  $V14$  との内積演算により求められる。そして、 $M14dmdvfilt$  を、 $M14actvfilt$  から減じたものを、偏差モーメント  $V14$  方向成分  $M14errv$  として得る。

尚、補償フィルタ  $114j'$  は、制御系における  $M14dmdv$  から実全床反力モーメントまでの伝達関数の周波数応答特性を改善するものである。

最後に次式 23 のフィードバック制御則（ここでは比例制御則）の演算によって前記第 14 ノード補償角  $\theta 14$  を得る。ここで  $K14$  は制御ゲインであり、通常、これは正の値に設定する。

$$\theta 14 = K14 * M14errv \quad \dots \text{式 23}$$

図 17 の補償角決定部（ $\theta 23$  決定部） $114d$  の処理は、第 14 ノード補償角  $\theta 14$  決定部  $114c$  の処理と同様であるので、ここでは詳細な説明を省略する。その処理の概要は、次の通りである。第 23 ノードの子ノードの実床反力によって目標第 23 ノード床反力中心点  $Q23$  のまわりに発生するモーメント  $M23act$  のベクトル  $V23$  方向の成分  $M23actv$  が前記式 16 または 17 に基づいて算出される。そして、その  $M23actv$  をローパスフィルタに通したものの  $M23actvfilt$  を、前記第 23 ノード補償床反力モーメント  $M23dmd$  の  $V23$  方向の成分  $M23dmdv$  を補償フィルタに通したものの  $M23dmdvfilt$  から減じてなる偏差モーメント  $V23$  方向成分  $M23errv$  からフィードバック制御則（比例制御則）の演算によって、前記第 23 ノード補償角  $\theta 23$  が算出される。

以上の補償角決定部  $114b \sim 114d$  の処理によって、目標全床反力中心点  $P$  に作用する実モーメント  $Mact$  の水平成分を補償全床反力モーメント  $Mdmd$  に近づけるようにノード補償角  $\theta 1423$ ,  $\theta 14$ ,  $\theta 23$  の組が決定されることとなる。なお、 $\theta 1423$  は、本参考例では、前記式



19により求めたが、式19の右辺の  $M_{1423err}$  の代わりに、 $M_{1423act}+M_{14act}+M_{23act}$ （実ノード床反力モーメントの総和）と、 $M_{1423dmd}$  との偏差、あるいは、実ノード床反力モーメントの総和と  $M_{1423dmd}$  とをそれぞれフィルタに通したものの偏差に応じて決定する  
5 ようにしてもよい。

補足すると、本参考例では、各ノードの目標ノード床反力中心点  $Q_n$  を変更せずに、その  $Q_n$  を作用点として、ノード補償床反力モーメントを決定した。そして、このノード床反力補償モーメント（より正確には、該ノード補償床反力モーメントと  $Q_n$  を作用点とする目標ノード床反力のモーメント成分との合力）と  $Q_n$  を作用点とする実ノード床反力モーメントとの偏差を制御量とし、この制御量を0に近づけるようにノード補償角を決定するようにした。このようにノード補償角を決定する代わりに次のようにノード補償角  $\theta_{1423}$ ,  $\theta_{14}$ ,  $\theta_{23}$  を決定するようにしてもよい。すなわち、子ノードを持つ各第  $n$  ノード ( $n=14, 23, 1423$ ) に対し、その第  $n$  ノードの実ノード床反力（第  $n$  ノードの全ての子ノードの実ノード床反力の合力）のモーメントの水平成分が0となるような床反力中心点を実第  $n$  ノード床反力中心点として求める。あるいは、第  $n$  ノード ( $n=14, 23, 1423$ ) の実ノード床反力のモーメントから、その各子ノードの実ノード床反力が該子ノードの目標ノード床反力中心点に作用する  
10 モーメントを減じてなるモーメントの水平成分が0となるような床反力中心点を実第  $n$  ノード床反力中心点として求める。例えば第14ノードに関する実第14ノード床反力中心点は、前記式16または式17により求めた  $M_{14act}$  の水平成分を、 $F_{1act}$  と  $F_{4act}$  との合力（実第14ノード床反力の並進力成分）の鉛直成分で割った値だけ、目標第14ノード床反力中心点を線分  $Q_1Q_4$  上ですらした点として求められる。第23  
15 ノード、第1423ノードのノード床反力中心点についても同様である。

そして、第  $n$  ノード ( $n=14, 23, 1423$ ) の目標ノード床反力中心点と、上記の如く求めた実第  $n$  ノード床反力中心点との偏差、あるいは、それらのノード床反力中心点のそれぞれをフィルタに通した値の偏差を制御量とし、その制御量を 0 に近づけるように、該制御量に応じてノード補償角  $\theta_{1423}$ ,  $\theta_{14}$ ,  $\theta_{23}$  を決定する（例えば制御量にあるゲインを乗算することで、 $\theta_{1423}$ ,  $\theta_{14}$ ,  $\theta_{23}$  を決定する）。

図 17 の修正目標接地部位位置姿勢算出部 114g は、第 1423 ノード補償角  $\theta_{1423}$ 、第 14 ノード補償角  $\theta_{14}$ 、第 23 ノード補償角  $\theta_{23}$  に基づき、前述した階層型コンプライアンス動作の目標接地部位位置姿勢の修正手法（図 15 および図 16 を参照して説明した手法）に従って各接地部位 10 の目標位置および目標姿勢である目標接地部位位置姿勢を修正し、修正目標接地部位位置姿勢を得る。ただし、本参考例においては、各脚 #1 ~ #4 の先端部にフリースポイント（球関節 12）があり、意図的に各接地部位 10 の姿勢を変化させることはできないので、修正目標接地部位位置姿勢は、実際には、修正目標接地部位位置を意味する。

図 21 は、図 17 の前記機構変形補償量算出部 114n の処理を示す機能ブロック図である。図 21 に示すように、機構変形補償量算出部 114n は、前記補償全床反力モーメント分配器 114a から出力される各接地部位 10 の修正目標接地部位床反力  $F_{n\_refmdfd}$  ( $n=1, 2, 3, 4$ )（目標接地部位床反力に、第 1423 ノード補償床反力モーメント  $M_{1423dmd}$ 、第 14 ノード補償床反力モーメント  $M_{14dmd}$  および第 23 ノード補償床反力モーメント  $M_{23dmd}$  を付加することによって修正された目標接地部位床反力）によって発生が予想される各脚 #1 ~ #4 の変形量（各脚のリンク機構およびコンプライアンス機構 42 の変形量）である機構変形量  $E_{n\_mdfd}$  ( $n=1, 2, 3, 4$ ) を求める。機構変形量  $E_{n\_mdfd}$  ( $n=1, 2, 3, 4$ ) は、各脚に作用する力（あるいは床反力）と該脚の変形との関係を表す機構

コンプライアンスモデルを用いて求められる。そして、機構変形補償量算出部 114n は、機構変形量  $En\_mdfd(n=1,2,3,4)$  を打ち消すための機構変形補償量  $En\_cmpn(n=1,2,3,4)$  を求める。機構変形補償量  $En\_cmpn$  は、各機構変形量に  $En\_mdfd$  に  $(-1)$  を乗じることにより求められる。

図 17 の機構変形補償入り修正目標接地部位位置姿勢算出部 114h は、算出された機構変形量  $En\_mdfd$  を打ち消すように、各接地部位 10 の修正目標接地部位位置姿勢（前記修正目標接地部位位置姿勢算出部 114g で求められ位置姿勢）をさらに修正し、各接地部位 10 の機構変形補償入り修正目標接地部位位置姿勢を得る。機構変形補償入り修正目標接地部位位置姿勢は、各接地部位 10 の修正目標接地部位位置姿勢に、それぞれに対応する機構変形補償量  $En\_cmpn$  を付加することにより決定される。

例えば、修正目標接地部位床反力によって、ある接地部位 10 に対応する脚のコンプライアンス機構 42 などが鉛直方向に  $z$  だけ縮むと算出された場合には、その接地部位 10 の目標位置を  $z$  だけ下げよう修正目標接地部位床反力が修正される。即ち、機構変形補償後の接地部位 10 の接地面（底面）が目標接地部位床反力を受けて変形したときの位置姿勢が、機構変形補償前の接地部位の接地面の目標位置姿勢に一致するように、機構変形補償入り修正目標接地部位位置姿勢を算出する。なお、これについての詳しい説明は、特開平 10-277969 号公報に詳細に説明されている。また、本参考例のロボット 1 では、接地部位 10 の姿勢を制御できないので、機構変形補償入り修正目標接地部位位置姿勢算出部 114h で実際に修正されるものは、各接地部位 10 の修正目標接地部位位置である。

上記のような機構変形補償は、コンプライアンス機構 42 などの変形

によって生じる実接地部位位置姿勢のずれをフィードフォワード的に打ち消す制御であり、この制御がない場合に比較し、より一層、目標歩容に近い形態でのロボット1の移動を実現することができる。

5 以上が、階層型コンプライアンス動作決定部114の処理の詳細である。

上記を前提として図9のフローチャートの説明に戻ると、S34において、前記の如く補償角を決定する。図22は、その補償角の決定処理のサブルーチンを一般化して示したフローチャートである。

同図を参照して説明すると、先ずS100において、各接地部位10  
10 の実床反力（前記実床反力検出器108で得られる実床反力）を基に、実第 $n$ ノード床反力の並進力成分  $F_{n\_act}(n=1,2,3,4,14,23,1423)$ を算出する。この場合、各葉ノードの実ノード床反力の並進力成分  $F_{n\_act}(n=1,2,3,4)$ は、前記実床反力検出器108による各接地部位10の実床反力の検出値の並進力成分である。また、葉ノードでない各ノ  
15 ードの実ノード床反力の並進力成分  $F_{n\_act}(n=14,23,1423)$ は、前記した如く、そのノードの子ノードの実ノード床反力の合力の並進力成分である。

次いでS102に進み、実第 $n$ ノード床反力モーメント  $M_{n\_act}$   
( $n=1,2,3,4,14,23,1423$ )を算出する。第1参考例のロボット1では、各  
20 葉ノードの実ノード床反力モーメント  $M_{n\_act}(n=1,2,3,4)$ は0である。また、葉ノードでない各ノードの実ノード床反力モーメント  $M_{n\_act}(n=14,23,1423)$ は、S100で得られた  $F_{n\_act}(n=1,2,3,4)$ と、目標ノード床反力中心点  $Q_n(n=1,2,3,4,14,23,1423)$ とから前記式16または式17に基づき算出される。

25 次いでS104に進み、前記姿勢安定化制御演算部104で求められた補償全床反力モーメント  $M_{dmd}$ を基に、第 $n$ ノード補償床反力モー

メント  $Mn\_dmd$  ( $n=14,23,1423$ )を決定する。この処理は、前記補償全床反力モーメント分配器 114a により前記した通り行なわれる。

次いで S106 に進み、階層型コンプライアンス動作の説明で定義したベクトル  $V1423$ ,  $V14$ ,  $V23$  およびこれに直交したベクトル  $U1423$ ,  $U14$ ,  $U23$  を求める。ただし、第1参考例では、ベクトル  $U1423$ ,  $U14$ ,  $U23$  の方向の床反力モーメントを発生することはできないので、 $U1423$ ,  $U14$ ,  $U23$  を求める必要はない。

補足すると、後述する第2参考例の如く、第  $n$  ノードの子ノードの数が3以上の場合には、 $Vn$  は、時間的に急激に変化しなければ、どの向きにとっても良いので、 $Vn$  の向きは、支持脚座標系の  $X$  軸の向きや、ロボットの上体の向きに合わせるなど、適当に決定すれば良い。また、 $Un$  は  $Vn$  に直交していればよい。

次いで S108 に進み、実第  $n$  ノード床反力モーメント  $Mn\_act$  ( $n=14,23,1423$ )の  $Vn$  方向成分  $Mn\_actv$  と  $Un$  方向成分  $Mn\_actu$  とを抽出する。これは、 $Mn\_act$  と  $Vn$ ,  $Un$  との内積演算を行なえばよい。なお、第1参考例のように葉ノードでない任意の第  $n$  ノードの子ノードの数が2以下の場合には、 $Un$  方向成分  $Mn\_actu$  は0である。従って、 $Mn\_actu$  は求める必要はない。

次いで S110 に進み、第  $n$  ノード補償床反力モーメント  $Mn\_dmd$  ( $n=14,23,1423$ )の  $Vn$  方向成分  $Mn\_dmdv$  と  $Un$  方向成分  $Mn\_dmdu$  を抽出する。これは、 $Mn\_dmd$  と  $Vn$ ,  $Un$  との内積演算を行なえばよい。なお、第1参考例のように葉ノードでない任意の第  $n$  ノードの子ノードの数が2以下の場合には、第  $n$  ノード補償床反力モーメント  $Mn\_dmd$  の  $Un$  方向成分  $Mn\_dmdu$  は0にする。あるいは、 $Mn\_dmdu$  を求める必要はない。

次いで S112 に進み、 $Mn\_actv$  をフィルタに通した値と  $Mn\_dmdv$

をフィルタに通した値の差にゲイン  $K_n$  を乗じることにより（より一般的には、当該差からフィードバック制御則により）第  $n$  ノード補償角  $\theta_n$  の  $V_n$  成分を決定する。第 1 参考例では、この処理は、第 14 ノード、第 23 ノード、第 1423 ノードについて、前記各補償角決定部 114 b, 114 c, 114 d により前記した如く実行される。

次いで S 114 に進み、 $M_{n\_actu}$  をフィルタに通した値と  $M_{n\_dmdu}$  をフィルタに通した値の差にゲイン  $K_n$  を乗じることにより（より一般的には当該差からフィードバック制御則により）第  $n$  ノード補償角  $\theta_n$  の  $U_n$  成分を決定する。ただし、第 1 参考例のように葉ノードでない任意の第  $n$  ノードの子ノードの数が 2 以下の場合には、第  $n$  ノード補償角  $U$  成分は 0 にする。あるいは、S 114 の処理を実行する必要はない。

以上が、図 9 の S 34 のサブルーチン処理である。補足すると、S 106 ~ S 114 の処理は、目標第  $n$  ノード床反力中心点に作用する実第  $n$  ノード床反力モーメントが第  $n$  ノード補償床反力モーメント（より正確には第  $n$  ノード補償床反力モーメントと目標第  $n$  ノード床反力中心点に作用する目標ノード床反力モーメントとの合力）に収束するように第  $n$  ノード補償角を決定する処理であると言える。

次いで、図 9 のフローチャートの S 36 に進み、前記機構変形補償量を算出する。この処理は、前記機構変形補償量算出部 114 n により前記した如く行なわれる。

次いで S 38 に進んで目標接地部位位置姿勢を S 34 で求めた補償角に応じて修正し、さらにこれを S 36 で求めた機構変形補償量に応じて修正することによって、各接地部位 10 の機構変形補償入り修正目標接地部位位置姿勢を得る。第 1 参考例では、前記修正目標接地部位位置姿勢算出部 114 g によって、前記した如く（前記 15 および図 16 を参

照して説明した如く) 補償角  $\theta_{1423}$ 、 $\theta_{14}$ 、 $\theta_{23}$  に基づき各接地部位  
10 の修正目標接地部位位置を求める。そして、この求めた修正目標接  
地部位位置が前記機構変形補償入り修正目標接地部位位置姿勢算出部 1  
1 4 h によって、前記した如く前記機構変形補償量  
5  $En\_cmpn(n=1,2,3,4)$ に応じてさらに修正され、それによって、各接地  
部位 10 の機構変形補償入り修正目標接地部位位置が得られる。

以上説明した図 9 の S 3 2 ~ S 3 8 の処理が、階層型コンプライアンス  
動作決定部 1 1 4 の処理である。

次いで S 4 0 に進み、目標上体位置姿勢と機構変形補償入り修正接地  
10 部位位置姿勢 (第 1 参考例では機構変形補償入り修正接地部位位置) から  
ロボット 1 の関節変位指令を算出する。この処理は、前記ロボット幾  
何学モデル 1 1 0 により前記した如く実行される。

次いで S 4 2 に進んで、実関節変位を関節変位指令に追従させる。こ  
の追従制御 (サーボ制御) は、前記変位コントローラ 1 1 2 により実行  
15 される。

次いで S 4 4 に進んで、時刻を  $\Delta t$  (制御装置 5 0 の演算処理周期)  
だけ更新し、S 1 4 に戻って上記の処理を繰り返す。

以上説明した第 1 参考例の如き階層型のコンプライアンス動作によ  
って、接地部位が 3 つ以上ある移動ロボットにおいても、各ノード床反  
20 力の制御が互いに殆ど干渉しないようになり、各ノード床反力を容易か  
つ適切に制御することができる。したがって、制御の干渉がなく、各ノ  
ードの実床反力が望ましい値からずれたり発振することがない。このた  
め、床面の大域的なうねりや傾斜だけでなく、局所的な凹凸や傾斜など  
も含む予期しない床形状変化があっても、その影響をあまり受けずに脚  
25 式移動ロボットに作用する床反力を適切に制御することができる。また、  
移動ロボットの姿勢を安定化する制御を容易に実現できると共に、移動

ロボットが受ける着地衝撃を低減することができ、移動ロボットの接地性を高め、移動時のスリップやスピンを防止することができる。さらに、移動ロボットのアクチュエータの負荷を低減することができる。したがって、各接地部位の床反力を適切に制御し、高い姿勢安定性を得ることができる。

ロボットの姿勢の安定化に対する効果を補足すると、ロボットが想定した床面上を想定した通りに歩行している状態から、ロボット全体が傾いた場合に、傾き角偏差  $\theta_{berr}$  ( $\theta_{berrx}$ ,  $\theta_{berry}$ ) とこれに応じて発生する目標全床反力中心点まわりのモーメント水平成分の増加量  $\Delta M$  との関係が、比例関係にあることが望ましい。そうでなくても、ある回転行列  $T$ 、ある対角行列  $\text{diag}(a,b)$  に対し、次式 24 が成立することが望ましい。なお、 $T$ ,  $\text{diag}(a,b)$  は 2 次の正方行列である。

$$T * \Delta M = \text{diag}(a,b) * T * \theta_{berr} \quad \cdots \text{式 24}$$

これらの関係を満足しない場合には、ロボットの姿勢が傾いた状態から戻る時に、直線的に傾き角偏差  $\theta_{berr}$  が 0 に収束せずに、味噌搦り運動を起こすおそれがある。例えば、ロボットの上体が前に傾いた状態では、後ろに戻す復元力以外に、横方向への転倒力（復元力）が余計に作用し、傾き角偏差  $\theta_{berr}$  が直線的に 0 に戻らずに、後ろ横方向に復元力が働いて、傾き角偏差  $\theta_{berr}$  が渦巻き状に 0 に収束していく。

また、上記と同じ理由から、コンプライアンス制御においては、ロボット全体の傾き角偏差  $\theta_{berr}$  の変化速度  $d\theta_{berr}/dt$  とこれに応じて発生するモーメントの増加量  $\Delta M_d$  との関係も、比例関係にあることが望ましい。そうでなくても、ある回転行列を  $T$ 、ある対角行列  $\text{diag}(e,f)$  に対し、次式 25 が成立することが望ましい。なお、 $T$ ,



$\text{diag}(a,b)$ は2次の正方行列である。

$$T * \Delta M_d = \text{diag}(e,f) * T * d\theta_{\text{berr}}/dt \quad \cdots \text{式 2 5}$$

- 5 一般的に、ロボットの各脚に独立にコンプライアンス制御を掛けると、これらの関係を満たさず、味噌擂り運動を起こすおそれがある。第1参考例に示した階層型コンプライアンス制御においては、前記式24, 25の関係を満足することができるので、ロボットの姿勢制御の収束性が高く、また、発振や振動を防止することができる。

10

- 前記第1参考例においては、目標接地部位位置を、各接地部位の姿勢を変えずに（姿勢を制御せずに）、各ノード床反力中心点まわりに回転移動させるように補正（修正）動作を行うことで、各接地部位10の間の相対高さを目標接地部位位置の間の相対高さから修正した。但し、目標接地部位位置を鉛直方向にだけ移動させるようにして、各接地部位15 10の高さだけを修正するようにしても良い。具体的には、以下の手順によって目標接地部位位置を修正する。

- まず、以下の式26, 27により、目標第14ノード床反力中心点の鉛直位置修正量  $Z_{14}$  と目標第23ノード床反力中心点の鉛直位置修正量  
20  $Z_{23}$  を求める。

$$Z_{14} = -PQ_{14} * \theta_{1423} \quad \cdots \text{式 2 6}$$

$$Z_{23} = PQ_{23} * \theta_{1423} \quad \cdots \text{式 2 7}$$

但し、ここで、 $\theta_{1423}$ には前記式19で求められる値を代入する。

- 25 次いで、各接地部位の目標床反力中心点（各葉ノードの目標ノード床反力中心点）の鉛直位置修正量  $Z_n(n=1,2,3,4)$ を次式により求める。

$$Z1 = -Q14Q1 * \theta 14 + Z14 \quad \cdots \text{式 2 8}$$

$$Z4 = Q14Q4 * \theta 14 + Z14 \quad \cdots \text{式 2 9}$$

$$Z2 = -Q23Q2 * \theta 23 + Z23 \quad \cdots \text{式 3 0}$$

$$5 \quad Z3 = Q23Q3 * \theta 23 + Z23 \quad \cdots \text{式 3 1}$$

但し、ここで、 $\theta 14$  には、前記式 2 3 で求められる値を代入し、 $\theta 23$  には、 $\theta 14$  と同様にして求められる値を代入する。

10 以上のように求めた  $Z1$ 、 $Z2$ 、 $Z3$ 、 $Z4$  を目標接地部位位置に鉛直方向に加えることにより、修正目標接地部位位置を得る。

また、前記第 1 参考例では、接地部位 1 0 を前記図 6 に示した如く階層化した。その階層構造は、必ずしも 1 つの階層構造にあらかじめ決めておく必要はない。例えばトロット、ギャロップなど、ロボット 1 の移動形態（移動時の脚の運動形態）などに応じて、階層構造を変更しても良い。例えば、図 2 3 に示す如く接地部位 1 0 を階層化してもよい。

15 図 2 3 は、例えばロボット 1 の全ての脚 # 1 ~ # 4 を支持脚とする時期において、第 1 接地部位 1 0 と第 2 接地部位 1 0 との組を第 12 ノードとし、第 3 接地部位 1 0 と第 4 接地部位 1 0 との組を第 34 ノードとした場合の例を前記図 3 (b) と同様に図示したものである。この例では、

20 各ノードの目標ノード床反力中心点  $Qn(n=1,2,3,4,12,34,1234)$  は図示の如く設定される。このようにすることで、場合によっては、前記コンプライアンス動作と、後述の床形状推定をよりの的確に行なうことが可能となる。

## 25 [第 2 参考例]

以下に前記図 1 並びに図 2 4 ~ 図 3 4 を参照しつつ、本発明の第 2 参

考例を説明する。図1を参照して、第2参考例のロボット1が第1参考例のロボットと異なる点を中心に説明すると、第2参考例のロボット1は、第1～第4脚#1～#4に加えて、これらの脚#1～#4と同じ構造の第5脚#5および第6脚#6を備える。すなわち、第2参考例のロボット1は6脚ロボットである。第5脚#5は、第3脚#3の後側でロボット1の上体24の右側部から延設され、第6脚#6は、第4脚#4の後側でロボット1の上体24の左側部から延設されている。これ以外のロボット1の機構的構造は、第1参考例と同一であるので、第1参考例と同一の参照符号を付して説明を省略する。

10 この第2参考例のロボット1（6脚ロボット）の階層型コンプライアンス制御の手法の基本的な考え方は第1参考例のものと同じである。但し、第2参考例の階層型コンプライアンス制御では、3つの子ノードを持つノードがあることと、それに対応して制御処理が拡張されていることとが第1参考例のものと相違している。

15 そこで、以降、その相違点を中心に第2参考例のロボット1の制御処理について説明する。なお、第2参考例の説明で用いる参照符号および用語は、第1参考例と同等の意味を持つものは、第1参考例と同じ参照符号および用語を用い、詳細な説明を省略する。

図24は、第2参考例における階層構造を説明するための図であり、  
20 第1参考例における図3（b）に対応する図である。図24に示す如く、第2参考例では、6個の接地部位10のそれぞれを葉ノード（第1～第6ノード）とし、その6個の全ての接地部位10の組を根ノード（第145236ノード）としていくと共に、第1脚#1、第4脚#4、第5脚#5のそれぞれの接地部位である第1、第4、第5接地部位10の組を  
25 第145ノード、第2脚#2、第3脚#3、第6脚#6のそれぞれの接地部位である第2、第3、第6接地部位10の組を第236ノードとし

ている。つまり、第 145 ノードは第 1、第 4、第 5 ノード（3 個の葉ノード）を子ノードとして持つ中間ノード、第 236 ノードは第 2、第 3、第 6 ノード（3 個の葉ノード）を子ノードとして持つ中間ノードである。

- 5 第 2 参考例では、例えば第 145 ノードの 3 個の接地部位 10 の組と、第 236 ノードの 3 個の接地部位 10 の組とを交互に持ち上げて着地させることにより、ロボット 1 の移動を行なうようにしている。図 24 は、両者の組を着地させた状態（両者の組を支持脚とした状態）を示しており、図中の参照符号  $Q_n(n=1,2,3,4,5,6)$  を付した三角形が各接地部位 10 の位置に対応している。

10 なお、 $Q_n(n=1,2,3,4,5,6)$  は、葉ノードである第 1 ～ 第 6 の各接地部位 10 の目標床反力中心点（目標ノード床反力中心点）、 $Q_{145}$ 、 $Q_{236}$  は、それぞれ第 145 ノード、第 236 ノードの目標床反力中心点（目標ノード床反力中心点）、 $P$  は根ノード（第 145236 ノード）の目標床反力中心点（目標ノード床反力中心点） $Q_{145236}$  としての目標全床反力中心点（＝目標 ZMP）を示すものである。第 1 参考例と同様に、 $Q_n(n=1,2,3,4,5,6)$  は、それぞれに対応する接地部位 10 の中心点に一致している。

20 第 2 参考例における制御装置 50 の全体的な機能的構成は、前記第 1 参考例に関して説明した図 2 のものと同じである。

この場合、第 2 参考例における歩容生成装置 100 は、第 1 参考例のものと同様に、ロボット 1 の目標運動軌道（目標接地部位軌道、目標上体位置姿勢軌道）と目標床反力軌道（目標全床反力中心点軌道、目標全床反力軌道）とを決定して出力する。但し、第 2 参考例では、目標接地部位軌道は、6 個の接地部位 10 のそれぞれの目標接地部位位置の軌道である。なお、各接地部位をその姿勢を制御可能に設けた場合には、目

標接地部位姿勢の軌道も目標接地部位軌道に含まれる。また、目標全床反力中心点軌道は、第2参考例における脚#1～#6の運動形態（特に支持脚の着地予定位置）に合わせて、ZMPの存在可能範囲内で該範囲の境界に近づきすぎない位置（例えばZMPの存在可能範囲のほぼ中央位置）に存在しつつ、連続的に移動するように決定される。

また、第2参考例における目標床反力分配器102では、第1参考例と同様に、次の条件A'）～F'）を満たすように、目標ノード床反力中心点と各ノードの重みと目標ノード床反力とを決定する。

A'）各葉ノードの目標ノード床反力中心点  $Q_n(n=1,2,3,4,5,6)$  は、該葉ノードに対応する接地部位10の中心点に一致する。より一般的には、 $Q_n(n=1,2,3,4,5,6)$  は、目標歩容（目標接地部位軌道などの目標運動）に応じて決定される。なお、例えば各接地部位10の目標床反力中心点を歩容生成装置100で決定した場合には、歩容生成装置100が決定する目標床反力を基に、目標ノード床反力中心点  $Q_n(n=1,2,3,4,5,6)$  を決定すればよい。

B'）根ノードの目標床ノード反力中心点は、目標全床反力中心点Pに一致する。

C'）子ノードを持つ任意の第nノード( $n=145,236,145236$ )の目標ノード床反力中心点  $Q_n$  は、その第nノードの各子ノードの目標ノード床反力中心点の重み付き平均の点となる。より具体的には、第145ノードの目標ノード床反力中心点  $Q_{145}$  は、その子ノード（葉ノード）である第1、4、5ノードの目標ノード床反力中心点  $Q_1, Q_4, Q_5$  を頂点とする三角形の内分点（三角形の境界の点を含む）となり、第236ノードの目標ノード床反力中心点  $Q_{236}$  は、その子ノード（葉ノード）である第2、3、6ノードの目標ノード床反力中心点  $Q_2, Q_3, Q_6$  を頂点とする三角形の内分点（三角形の境界の点を含む）となる。また、第

145236 ノード（根ノード）の目標ノード床反力中心点  $Q_{145236}$ （＝目標全床反力中心点  $P$ ）は、その子ノード（中間ノード）である第 145、236 ノードの目標ノード床反力中心点  $Q_{145}$ ,  $Q_{236}$  を結ぶ線分の内分点となる。

- 5 D') 子ノードを持つ任意の第  $n$  ノード ( $n=145, 236, 145236$ ) の目標ノード床反力  $F_n$  は、該第  $n$  ノードのすべての子ノードの目標ノード床反力の和（合力）に一致し、且つ、根ノード（第 145236 ノード）の目標ノード床反力  $F_{145236}$  は目標全床反力  $F_{totalref}$  に一致する。あるいは、各ノードの目標ノード床反力  $F_n$  ( $n=1, 2, 3, 4, 5, 6, 145, 236, 145236$ ) は、
- 10 各ノードの重みと前記式 4 a または 4 b の関係を有する。

E') 接地していない接地部位 10 に対応する葉ノードの目標ノード床反力は 0 となる。

F') 各ノード（第  $n$  ノード ( $n=1, 2, 3, 4, 145, 236, 145236$ )）の目標ノード床反力中心点、重み、目標ノード床反力は連続的に変化する。

- 15 G') 非接地状態の接地部位 10 に対応する葉ノードの重み、または、その葉ノードの祖先ノードのいずれか 1 つの重みは 0 とされる。

なお、根ノードの重みは、前記第 1 参考例と同様、便宜的に「1」に設定した。

- 第 2 参考例における姿勢偏差演算部 103 および姿勢安定化制御演算
- 20 部 104 の処理は、第 1 参考例と同じであり、補償全床反力モーメント  $M_{dmd}$  ( $M_{dmdx}$ ,  $M_{dmdy}$ ) が第 1 参考例で説明した如く決定される。

- また、第 2 参考例における実床反力検出器 108 は、第 1 参考例のものと同様に、各接地部位 10（本参考例では 6 個の接地部位）に作用する実床反力を各脚 #1 ～ #6 に備えた 6 軸力センサ 34 の出力から検出
- 25 し、それを支持脚座標系（床に固定された図 1 に示すグローバル座標系）で表現してなる実床反力に変換する。

また、第2参考例におけるロボット幾何学モデル（逆キネマティクス演算部）110は、第1参考例のものと同様に、各接地部位位置の最終的な目標軌道と目標上体位置姿勢などを基に、逆キネマティクスの演算によって、それらを満足するロボット1の各関節変位指令を算出する。

- 5      また、第2参考例における変位コントローラ112は、第1参考例のものと同様に、前記各関節変位指令に実関節変位を追従させるようにロボット1の各関節14、15のアクチュエータ（図示しない）を制御する。

- 10      また、第2参考例における階層型コンプライアンス動作決定部114は、第1参考例のものと同様に前記要求1)、2)をできるだけ満足するように各接地部位10の目標接地部位軌道を修正する。但し、本参考例では、3つの子ノードを持つ中間ノードを有するため、階層型コンプライアンス動作決定部114の具体的な処理は、第1参考例のものより多少複雑になる。なお、各接地部位10の姿勢を制御可能にロボットを  
15      構成した場合には、階層型コンプライアンス動作決定部114は、前記要求3)もできるだけ満足するように各接地部位10の目標接地部位軌道を修正すべきである。

- 20      図25は、第2参考例の階層型コンプライアンス動作決定部114の機能を示すブロック図であり、第1参考例における図17に対応している。同図25を参照して、第2参考例の階層型コンプライアンス動作決定部114も、第1参考例と同様に、補償全床反力モーメント分配器114a、補償角決定部114b、114c、114dと、修正目標接地部位位置姿勢算出部114gと、機構変形補償量算出部114nと、機構変形補償入り修正目標接地部位位置姿勢決定部114hとを構成要素  
25      （機能的手段）として備える。なお、第2参考例では、補償角は、第145236ノード、第145ノード、第236ノードにそれぞれ係わる第

145236 補償角  $\theta_{145236}$ 、第 145 補償角  $\theta_{145}$  および第 236 補償角  $\theta_{236}$  があり、補償角決定部 114b, 114c, 114d は、それぞれ  $\theta_{145236}$ 、 $\theta_{145}$ 、 $\theta_{236}$  を決定するものである。

以下に、第 2 参考例における階層型コンプライアンス動作決定部 114 の処理を、第 1 参考例のものと異なる点を中心に説明する。

第 2 参考例における階層型コンプライアンス動作決定部 114 は、第 1 参考例のものと同様に、目標床反力分配器 102 の出力などを基に、各ノードの目標ノード床反力の並進力成分およびモーメント成分を決定すると共に、実床反力検出器 108 の出力を基に、各ノードの実ノード床反力の並進力成分およびモーメント成分を決定する。

すなわち、図 26 を参照して、各葉ノードの目標ノード床反力の並進力成分  $F_{n\_ref}(n=1,2,3,4,5,6)$  は、目標床反力分配器 102 で決定された目標ノード床反力の並進力成分と同一とされ、根ノードの目標ノード床反力の並進力成分  $F_{145236ref}$  は、歩容生成装置 100 で決定された目標全床反力の並進力成分  $F_{totalref}$  と同一とされる。また、葉ノードおよび根ノード以外の中間ノードの目標ノード床反力の並進力成分  $F_{n\_ref}(n=145,236)$  は、その中間ノードの各子ノードの目標ノード床反力の合力の並進力成分に決定される ( $F_{145ref}=F_{1ref}+F_{4ref}+F_{5ref}$ 、 $F_{236ref}=F_{2ref}+F_{3ref}+F_{6ref}$ )。この場合、中間ノードの親ノードは根ノードであるので、 $F_{145ref}+F_{236ref}=F_{totalref}$  である。なお、図 26 は、第 2 参考例のロボット 1 の全ての接地部位 10 が接地している状態での各ノードの目標ノード床反力の並進力成分  $F_{n\_ref}$  を例示している。

また、各ノードの目標ノード床反力のモーメント成分（詳しくは該ノードの目標ノード床反力中心点を作用点とする目標ノード床反力のモーメント成分）は、いずれも 0 とされる。



また、図30を参照して、各葉ノードの実ノード床反力の並進力成分  $F_{n\_act}(n=1,2,3,4,5,6)$  は、実床反力検出器108で検出された各接地部位10の実床反力の並進力成分と同一とされる。そして、子ノードをもつ各ノードの実ノード床反力の並進力成分  $F_{n\_act}(n=145,236,145236)$  は、そのノードの各子ノードの実ノード床反力の合力の並進力成分に決定される。従って、 $F_{145act}=F_{1act}+F_{4act}+F_{5act}$ 、 $F_{236act}=F_{2act}+F_{3act}+F_{6act}$ 、 $F_{145236act}(=F_{totalact})=F_{145act}+F_{236act}$  である。なお、図30は、第2参考例のロボット1の全ての接地部位10が接地している状態での各ノードの実ノード床反力の並進力成分  $F_{n\_act}$  を例示している。

また、図31を参照して、各葉ノードの実ノード床反力のモーメント成分（該葉ノードの目標ノード床反力中心点を作用点とするモーメント成分） $M_{n\_act}(n=1,2,3,4,5,6)$  は、基本的には、実床反力検出器108で検出された各接地部位10の実床反力のモーメント成分と同一とされる。ただし、本参考例では、各接地部位10の中心点、すなわち該接地部位10の目標床反力中心点に実モーメントは発生しないので、各葉ノードの実ノード床反力のモーメント成分は0に設定される。そして、子ノードをもつ各第nノード( $n=145,236,145236$ )の実ノード床反力のモーメント成分  $M_{n\_act}$  は、基本的にはその第nノードの各子ノードの実ノード床反力の合力が、該第nノードの目標ノード床反力中心点に作用するモーメント成分（これは一般に0にならない）に決定される。

第2参考例における前記補償全床反力モーメント分配器114aは、前記補償全床反力モーメント  $M_{dmd}$  を前記補償全床反力モーメント  $M_{dmd}(M_{dmdx}, M_{dmdy})$  を、第145236ノード補償床反力モーメント  $M_{145236dmd}$ 、第145ノード補償床反力モーメント  $M_{145dmd}$  および第236ノード補償床反力モーメント  $M_{236dmd}$  に分配するものであ

る。

第 145236 ノード補償床反力モーメント  $M_{145236dmd}$  は、第 145236 補償角  $\theta_{145236}$  を操作することによって（第 1、第 4、第 5 接地部位の組と、第 2、第 3、第 5 接地部位の組とを目標全床反力中心点  $P(=Q_{145236})$  まわりに  $\theta_{145236}$  だけ回転させることによって）発生する各接地部位 10 の床反力の並進力成分が、目標全床反力中心点  $P$ （目標  $ZMP$ ）まわりに発生すべきモーメントの目標値である。

第 145 ノード補償床反力モーメント  $M_{145dmd}$  は、第 145 補償角  $\theta_{145}$  を操作することによって（第 145 ノードに属する第 1、第 4 および第 5 接地部位 10 を目標第 145 ノード床反力中心点  $Q_{145}$  まわりに  $\theta_{145}$  だけ回転させることによって）発生する各接地部位 10（詳しくは第 1、第 4、および第 5 接地部位）の床反力の並進力成分が、目標第 145 ノード床反力中心点まわりに発生すべきモーメントの目標値である。

第 236 ノード補償床反力モーメント  $M_{236dmd}$  は、第 236 補償角  $\theta_{236}$  を操作することによって（第 236 ノードに属する第 2、第 3 および第 6 接地部位 10 を目標第 236 ノード床反力中心点  $Q_{236}$  まわりに  $\theta_{236}$  だけ回転させることによって）発生する各接地部位 10（詳しくは第 2、第 3、および第 6 接地部位）の床反力の並進力成分が、目標第 236 ノード床反力中心点まわりに発生すべきモーメントの目標値である。

20    なお、本参考例では、第 1 参考例と同様、ロボット 1 の鉛直軸まわりの姿勢制御を行なわないので（補償全床反力モーメント  $M_{dmd}$  の鉛直軸回りの成分が 0 であるので）、 $M_{145236dmd}$ 、 $M_{145dmd}$ 、 $M_{236dmd}$  は、いずれも鉛直軸回りの成分が 0 であるモーメント（水平ベクトル）であり、補償角  $\theta_{145236}$ 、 $\theta_{145}$ 、 $\theta_{236}$  は、水平な軸回りの回転角である。また、特に、 $M_{145236dmd}$  は、線分  $Q_{145}Q_{236}$  に垂直な水平軸回りのモーメントである。

これらのノード補償床反力モーメント  $M_{145236dmd}$ ,  $M_{145dmd}$ ,  $M_{236dmd}$  は、基本的には、次の条件 1 1)、1 2) を満たすように決定される。

- 5 1 1) 第 145 ノード、第 236 ノード、第 145236 ノードに対して、前記第 1 参考例で定義した如く、次式 7 a ~ 9 a の関係式を満たす修正目標ノード床反力中心点  $Q_{145mdfd}$ 、 $Q_{236mdfd}$ 、 $P_{mdfd}$  ( $=Q_{145236mdfd}$ ) を導入したとき、これらの  $Q_{145mdfd}$ 、 $Q_{236mdfd}$ 、 $P_{mdfd}$  は、それぞれの所定の存在許容範囲内に在る。

10

$$M_{145236dmd} = (P_{mdfd} - P) * F_{totalref} \quad \dots \text{式 7 a}$$

$$M_{145dmd} = (Q_{145mdfd} - Q_{145}) * F_{145ref} \quad \dots \text{式 8 a}$$

$$M_{236dmd} = (Q_{236mdfd} - Q_{236}) * F_{236ref} \quad \dots \text{式 9 a}$$

- 15  $Q_{145mdfd}$ 、 $Q_{236mdfd}$ 、 $P_{mdfd}$  の存在可能範囲は、例えば第 2 参考例のロボット 1 の全ての接地部位 10 が接地している状態では、図 29 (a) に示す如く設定される。すなわち、 $Q_{145mdfd}$  の存在許容範囲は、図中の太線の三角形上の領域（その三角形の辺および内部の領域）であり、これは、第 145 ノードの子ノードの目標ノード床反力中心点
- 20  $Q_1, Q_4, Q_5$  を頂点する三角形の内部で、該三角形  $Q_1Q_4Q_5$  の境界に近づき過ぎないように設定された領域である。 $Q_{236mdfd}$  の存在許容範囲も同様である。また、 $P_{mdfd}$  の存在許容範囲は、図中の太線の線分上の領域であり、これは、第 145236 ノード（根ノード）の子ノードの目標床反力中心点  $Q_{145}, Q_{236}$  を結ぶ線分  $Q_{145}Q_{236}$  上で、該線分
- 25  $Q_{145}Q_{236}$  の端点に近づき過ぎないように設定された領域である。

- 1 2)  $M_{dmd} = M_{145236dmd} + M_{145dmd} + M_{236dmd}$  をほぼ満足する。

また、本参考例では、根ノード（第 145236 ノード）の子ノードが 2 つであることから、 $M_{145236dmd}$  は、前記第 1 参考例における各ノード補償床反力モーメントと同様に、線分  $Q_{145}Q_{236}$  に直交する水平な  
5 単位ベクトル（これを  $V_{145236}$  で表す）と同方向のベクトルに制限される。そこで、本参考例では、次の条件 1 3）を満たすように  $M_{145236dmd}$ ,  $M_{145dmd}$ ,  $M_{236dmd}$  を決定する。

1 3)  $M_{145236dmd} + M_{145dmd} + M_{236dmd}$  の、ベクトル  $V_{145236}$  方向の成分は、可能な限り、 $M_{dmd}$  のベクトル  $V_{145236}$  方向の成分に近い値とする。

これらの条件 1 1) ~ 1 3) を満たす  $M_{145236dmd}$ ,  $M_{145dmd}$ ,  $M_{236dmd}$  は、例えば次のように決定される。まず、 $M_{145236dmd}$  を  
15  $M_{dmd}$  の  $V_{145236}$  方向の成分に決定する。ただし、前記式 7 a) により定まる修正目標ノード床反力中心点  $P_{mdfd}$  がその存在許容範囲に収まらない場合には、 $P_{mdfd}$  がその存在許容範囲の境界の点になるように、 $M_{145236dmd}$  を修正する。次いで、 $M_{dmd}$  から上記の如く決定した  $M_{145236dmd}$  を差し引いたベクトルが、 $M_{dmd145}$  と  $M_{dmd236}$  との  
20 和にほぼ一致し、且つ、 $M_{dmd145} + M_{dmd236}$  の  $V_{145236}$  方向の成分が  $M_{dmd} - M_{dmd145236}$  の  $V_{145236}$  成分にできるだけ近いものとなり、且つ前記条件 1 1) を満たすように、 $M_{dmd145}$ ,  $M_{dmd236}$  を決定する。なお、この場合、 $M_{dmd145}$ ,  $M_{dmd236}$  は、互いに平行なベクトルとする。

25 このように決定された  $M_{145236dmd}$ ,  $M_{145dmd}$ ,  $M_{236dmd}$  の例を図 2 9 (b) に示す。補足すると、 $M_{145236dmd}$  は、前記したように

線分 Q145Q236 に垂直な水平ベクトルである。

なお、ロボット 1 の鉛直軸回りの姿勢も制御するような場合には、M145236dmd、M145dmd、M236dmd の鉛直成分も決定するようにしてもよい。

- 5 第 2 参考例における各補償角決定部 114b~114d は、基本的には、それぞれ第 n ノード (n=145236,145,236) の、ノード補償床反力モーメントと、実ノード床反力モーメント（目標ノード床反力中心点を作用点とするモーメント）との偏差に応じて、その偏差を 0 に近づけるようにノード補償角  $\theta_{145236}$ 、 $\theta_{145}$ 、 $\theta_{236}$  を決定する。図 30 および
- 10 図 31 にその例を示す。この場合、本参考例では、 $\theta_{145}$  は、図 30 に示す如く、偏差  $M_{145act} - M_{145dmd}$  と同方向で、目標第 145 ノード床反力中心点 Q145 を通る軸回りの回転角、 $\theta_{236}$  は、図 30 に示す如く、偏差  $M_{236act} - M_{236dmd}$  と同方向で、目標第 236 ノード床反力中心点 Q236 を通る軸回りの回転角である。また、 $\theta_{145236}$  は、図 3
- 15 1 に示す如く、偏差  $M_{145236act} - M_{145236dmd}$  と同方向（線分 Q145Q236 に垂直な水平方向）で、目標全床反力中心点 P を通る軸回りの回転角である。

- 但し、本参考例においても、第 1 参考例と同様に、第 n ノード (n=145236,145,236) の、ノード補償床反力モーメントをフィルタに通
- 20 したものと、実ノード床反力モーメントをフィルタに通したものの偏差に応じて、ノード補償角  $\theta_{145236}$ 、 $\theta_{145}$ 、 $\theta_{236}$  を決定するようにした。

- 図 32 は上記の如くノード補償角  $\theta_{145236}$  を決定する補償角決定部 114b ( $\theta_{145236}$  決定部) の機能を示すブロック図、図 33 は上記
- 25 の如くノード補償角  $\theta_{145}$  を決定する補償角決定部 114c ( $\theta_{145}$  決定部) の機能を示すブロック図である。なお、補償角決定部 114d

( $\theta 236$  決定部) の処理は、 $\theta 145$  決定部 1 1 4 b の処理と同様であるので詳細な説明および図示を省略する。

補償角決定部 ( $\theta 145236$  決定部) 1 1 4 b では、まず、目標第 145 ノード床反力中心点  $Q145$  に実第 1、第 4、第 5 ノード床反力の合力の並進力成分( $F1act + F4act + F5act$ ) が作用すると共に、目標第 236 ノード床反力中心点  $Q236$  に実第 2、第 3、第 6 ノード床反力の合力の並進力成分( $F2act + F3act + F6act$ ) が作用した場合に、目標全床反力中心点  $P$  (目標第 145236 ノード床反力中心点) のまわりに発生するモーメント  $M145236act$  を前記式 1 6 または 1 7 に基づいて求める。そして、その求めた  $M145236act$  の、ベクトル  $V145236$  方向の成分  $M145236actv$  を内積演算によって求める。ここでベクトル  $V145236$  は、線分  $Q145Q236$  に垂直で且つ水平な単位ベクトルである。なお、第 145236 ノードに関しては、 $V145236$  に垂直で且つ水平な単位ベクトル  $U145236$  の方向の軸回りに子ノード (第 145 ノードおよび第 236 ノード) の目標床反力中心点の位置を操作できないので、 $M145236act$  のベクトル  $U145236$  方向の成分は求める必要はない。

次いで、前記第 1 参考例と同様に、この  $M145236actv$  をローパスフィルタに通したものの  $M145236actvfilt$  と、前記第 145236 ノード補償床反力モーメント  $M145236dmd$  のベクトル  $V$  方向の成分  $M145236dmdv$  を補償フィルタに通したものの  $M145236dmdvfilt$  との偏差  $M145236errv$  ( $= M145236actvfilt - M145236dmdvfilt$ ) に所定のゲイン  $K145236$  を乗算することで、第 145236 ノード補償角  $\theta 145236$  が決定される。

補償角決定部 ( $\theta 145$  決定部) 1 1 4 c では、まず、目標第 1、第 4、第 5 ノード床反力中心点  $Q1$ ,  $Q4$ ,  $Q5$  にそれぞれ実第 1、第 4、第 5 ノード床反力の並進力成分  $F1act$ ,  $F4act$ ,  $F5act$  が作用した場合に、第 145 ノード床反力中心点  $Q145$  のまわりに発生するモーメント

M145act を算出する。この場合、算出する M145act は、互いに直交する水平な単位ベクトルであるベクトル V145 および U145 のそれぞれの方向の成分から構成される。ベクトル V145 または U145 の向きは、任意でよい。

- 5      次いで、この M145act をローパスフィルタに通したものの M145actfilt と、前記第 145 ノード補償床反力モーメント M145dmd (ベクトル V 方向の成分およびベクトル U 方向の成分) を補償フィルタに通したものの M145dmdfilt との偏差 M145err (=M145actfilt - M145dmdfilt) に所定のゲイン行列 K145 (対角行列) を乗算すること  
10   で、第 145 ノード補償角  $\theta_{145}$  が決定される。 $\theta_{145}$  は、ベクトル V の軸回り角度成分とベクトル U の軸回りの角度成分とから構成される。

補償角決定部 ( $\theta_{236}$  決定部) 114d による第 236 ノード補償角  $\theta_{236}$  の決定処理も、上記した  $\theta_{145}$  決定部 114c の処理と同様に行なわれる。

- 15   以上説明した補償角決定部 114b ~ 114d の処理によって、目標全床反力中心点 P に作用する実モーメント Mact の水平成分を補償全床反力モーメント Mdmd に近づけるようにノード補償角  $\theta_{145236}$ ,  $\theta_{145}$ ,  $\theta_{236}$  の組が決定されることとなる。

- 20   なお、第 1 参考例に関して補足説明したように、次のようにノード補償角  $\theta_{145236}$ ,  $\theta_{145}$ ,  $\theta_{236}$  を決定するようにしてもよい。すなわち、子ノードを持つ各第 n ノード (n=145,236,145236) に対し、その第 n ノードの実ノード床反力 (第 n ノードの全ての子ノードの実ノード床反力の合力) のモーメントの水平成分が 0 となるような床反力中心点を実第 n ノード床反力中心点として求める。あるいは、第 n ノード  
25   (n=145,236,145236) の実ノード床反力のモーメントから、その各子ノードの実ノード床反力が該子ノードの目標ノード床反力中心点に作用す

るモーメントを減じてなるモーメントの水平成分が0となるような床反力中心点を実第 $n$ ノード床反力中心点求める。そして、第 $n$ ノード( $n=145, 236, 145236$ )の目標ノード床反力中心点と、上記の如く求めた実第 $n$ ノード床反力中心点との偏差、あるいは、それらのノード床反力中心点のそれぞれをフィルタに通した値の偏差を制御量とし、その制御量を0に近づけるように、該制御量に応じてノード補償角 $\theta_{145236}$ ,  $\theta_{145}$ ,  $\theta_{236}$ を決定する(例えば制御量にあるゲインを乗算することで、 $\theta_{145236}$ ,  $\theta_{145}$ ,  $\theta_{236}$ を決定する)。

図25に示した第2参考例における修正目標接地部位位置姿勢算出部114gは、次のように、各接地部位10の目標接地部位位置姿勢(図1のロボットでは実際には目標接地部位位置)を修正し、修正目標接地部位位置姿勢を得る。すなわち、図30および図31を参照して、第145ノードの子ノードである第1、第4および第5ノードの目標床反力中心点 $Q_1$ ,  $Q_4$ ,  $Q_5$ をそれぞれ、第145ノードの目標床反力中心点 $Q_{145}$ を回転中心として、第145ノード補償角 $\theta_{145}$ (水平ベクトル)だけ回転移動する。この回転移動後の $Q_1$ ,  $Q_4$ ,  $Q_5$ をそれぞれ $Q_1'$ ,  $Q_4'$ ,  $Q_5'$ とする。従って、第145ノード補償角 $\theta_{145}$ は、第145ノードの目標床反力中心点 $Q_{145}$ の位置を動かさずに、第145ノードの子ノードである第1、第4、第5ノードのそれぞれの目標床反力中心点 $Q_1$ ,  $Q_4$ ,  $Q_5$ の位置の相対関係を動かすための操作量である。

同様に、第236ノードの子ノードである第2、第3および第6ノードの目標床反力中心点 $Q_2$ ,  $Q_3$ ,  $Q_6$ をそれぞれ、第236ノードの目標床反力中心点 $Q_{236}$ を回転中心として、第236ノード補償角 $\theta_{236}$ (水平ベクトル)だけ回転移動する。この回転移動後の $Q_2$ ,  $Q_3$ ,  $Q_6$ をそれぞれ $Q_2'$ ,  $Q_3'$ ,  $Q_6'$ とする。従って、第236ノード補償角 $\theta_{236}$ は、第236ノードの目標床反力中心点 $Q_{236}$ の位置を動かさずに、第236



ノードの子ノードである第2、第3、第6ノードのそれぞれの目標床反力中心点  $Q_2$ ,  $Q_3$ ,  $Q_6$  の位置の相対関係を動かすための操作量である。

これらの回転移動を視覚的に示したものが図30である。

次いで、第145236ノードの子ノードである第145および第236ノードの目標床反力中心点  $Q_{145}$ ,  $Q_{236}$  をそれぞれ、第145236ノードの目標床反力中心点  $P$  (目標全床反力中心点) を回転中心として、前記偏差  $M_{145236errv}$  のベクトル (水平ベクトル) と同方向 (線分  $Q_{145}Q_{236}$  と直交する水平方向) の軸心まわりに第145236ノード補償角  $\theta_{145236}$  だけ回転移動する。この回転移動後の  $Q_{145}$ ,  $Q_{236}$  を図31に示す如くそれぞれ  $Q_{145}'$ ,  $Q_{236}'$  とする。従って、第145236ノード補償角  $\theta_{145236}$  は、第145236ノード (根ノード) の目標床反力中心点  $P$  の位置を動かさずに、第145236ノードの子ノードである第145、第236ノードのそれぞれの目標床反力中心点  $Q_{145}$ ,  $Q_{236}$  の位置の相対関係を動かすための操作量である。

次いで、図31を参照して、先の回転移動後の目標ノード床反力中心点  $Q_1'$ ,  $Q_4'$ ,  $Q_5'$  をベクトル  $Q_{145}Q_{145}'$  だけ平行移動し、これにより、第1、第4および第5ノードの最終的な修正後の目標ノード床反力中心点  $Q_1''$ ,  $Q_4''$ ,  $Q_5''$  を得る。同様に、先の回転移動後の目標ノード床反力中心点  $Q_2'$ ,  $Q_3'$ ,  $Q_6'$  をベクトル  $Q_{236}Q_{236}'$  だけ平行移動し、これにより、第2、第3および第6ノードの最終的な修正後の目標ノード床反力中心点  $Q_2''$ ,  $Q_3''$ ,  $Q_6''$  を得る。

最後に、第  $n$  接地部位 ( $n=1,2,3,4,5,6$ ) の目標接地部位位置を、ベクトル  $Q_nQ_n''$  だけ平行移動 (ほぼ上下移動) させる。これにより、各接地部位10の目標接地部位位置 (より正確には各接地部位10の目標接地部位位置の相対関係) が修正されることとなる。すなわち、子ノードを持つ各ノード毎に、そのノードの子孫ノードとなっている各接地部位

10. の目標接地部位位置の間の相対関係（相対的位置関係）の操作量（修正量）が各補償角  $\theta_{145}$ ,  $\theta_{236}$ ,  $\theta_{145236}$  に応じて定められ、それらの操作量（修正量）を合成することで、各接地部位 10 の目標接地部位位置の相互の相対関係が修正されることとなる。

- 5      なお、接地部位の姿勢を制御可能として、接地部位の目標床反力中心点まわりに床反力モーメントを発生させることができるロボットでは、各接地部位の目標接地部位床反力中心点（目標ノード床反力中心点）まわりの足平姿勢回転動作を、特開平 10-277969 号公報（複合コンプライアンス制御）に示した手法で行なえば良い。すなわち、第 1 参考例
- 10    例に関して補足説明した如く、第  $n$  接地部位を上記の平行移動後の  $Q_n''$  を中心として、該第  $n$  接地部位の目標姿勢を修正するようにすればよい。

- 図 25 に示した第 2 参考例における機構変形補償量算出部 114n は、前記第 1 参考例のものと同様に、各各脚 #1 ~ #6 のコンプライアンス
- 15    機構 42 などの変形による影響を補償するための機構変形補償量  $E_{n\_cmpn}(n=1,2,3,4,5,6)$  を求める。すなわち、第 2 参考例における補償全床反力モーメント分配器 114a から出力される各接地部位 10 の修正目標接地部位床反力  $F_{n\_refmdfd}(n=1,2,3,4,5,6)$ （目標接地部位床反力に、各ノード補償床反力モーメント  $M_{145236dmd}$ 、 $M_{145dmd}$ 、
- 20     $M_{236dmd}$  を付加することによって修正された目標接地部位床反力）によって発生が予想される各脚 #1 ~ #6 のコンプライアンス機構 42 などの機構変形量  $E_{n\_mdfd}(n=1,2,3,4,5,6)$  を機構コンプライアンスモデルを用いて求める。この  $E_{n\_mdfd}$  に（-1）を乗算したものを機構変形補償量  $E_{n\_cmpn}$  として求める。

- 25    図 25 に示した第 2 参考例における機構変形補償入り修正目標接地部位位置姿勢算出部 114h は、第 1 参考例のものと同様に、機構変形補

償入り修正目標接地部位位置姿勢は、各接地部位 10 の修正目標接地部位位置姿勢（前記修正目標接地部位位置姿勢算出部 114g で求められ位置姿勢）に、それぞれに対応する機構変形補償量  $E_{n\_cmpn}$  を付加することにより決定される。

- 5      以上が、本参考例（第 2 参考例）における階層型コンプライアンス動作決定部 114 の処理の詳細である。

以上説明した以外の制御装置 50 の演算処理は、第 1 参考例と同じである。

- 10      なお、第 2 参考例における階層構造は、第 1 参考例の場合と同様に、  
ロボット 1 の動作形態（移動形態）などに応じて変更しても良い。例えば、図 34 に示す如く、階層構造を設定してもよい。この図示の例では、  
第 1 接地部位および第 2 接地部位を子ノード（葉ノード）としてもつ第 12 ノードと、  
第 3 接地部位および第 4 接地部位を子ノード（葉ノード）としてもつ第 34 ノードと、  
15      第 5 接地部位および第 6 接地部位を子ノード（葉ノード）としてもつ第 56 ノードと、  
第 56 ノードおよび第 34 ノードを子ノードとしてもつ第 3456 ノードとを中間ノードとして  
備え、根ノードは、第 3456 ノードと、第 12 ノードとを子ノードとしてもつものとされている。  
このようにすることで、コンプライアンス動作および後述の床形状推定をよりの確に行なうことが可能となる場合がある。  
20      なお、図中の符号の意味は、前記図 3（b）や図 24 などに示したものと同様である。

### 〔第 3 参考例〕

- 次に、第 2 参考例のロボット 1（6 脚ロボット）に床形状推定機能と  
25      その推定結果に応じたロボット 1 の動作補正機能とを付加した第 3 参考例について説明する。なお、本参考例では、主に、第 2 参考例で示した

6脚ロボットを中心として説明するが、4脚ロボットについても補足的に説明を付加する場合がある。また、本参考例の理解の便宜上、2脚ロボットについても言及する場合がある。

本参考例におけるロボット1の機構的構成は、第1または第2参考例  
5 で説明した図1に示したもの（ただし、6個の脚#1～#6を有するロボット1）と同じである。従って、ロボット1の機構的構成の説明は省略する。また、本参考例におけるロボット1に備えた制御装置50の機能的構成も、前記図2に示したものと同じである。但し、本参考例では、  
10 図2中の階層型コンプライアンス動作決定部114には、新たな機能が付加されており、その点が第2参考例のものと相違している。そして、階層型コンプライアンス動作決定部114以外の制御装置50の構成要素の処理は、第2参考例と同一である。そこで、本参考例での説明では、階層型コンプライアンス動作決定部114の処理を中心に説明し、これ  
15 以外の制御装置50の処理については、詳細な説明を省略する。

図35は、本参考例における階層型コンプライアンス動作決定部11  
4の処理機能を示すブロック図である。このうち、第2参考例のものと異なる機能を説明すると、本参考例における階層型コンプライアンス動作決定部114には、新たに、床形状推定手段としての床形状推定器1  
30と、床形状推定器130が出力（推定）する推定床形状偏差（より  
20 詳しくは各接地部位10に係る後述の床高さ偏差の推定値）を修正目標接地部位位置姿勢に加算する加算器132とが付加され、加算器132の出力を、修正目標接地部位位置姿勢の代わりに機構変形補償入り修正目標接地部位位置姿勢算出部114hに入力するようにしている。これ  
25 以外の階層型コンプライアンス動作決定部114の構成要素の処理は第2参考例のものと同一である。

また、これに伴い、本参考例での制御装置50のメインルーチンの制

御処理は、その一部が前記図9のフローチャートに示した制御処理と相違している。図36は本参考例における制御装置50のメインルーチンの制御処理を示すフローチャートである。図示の如く、本参考例では、S36の後に、新たにS37で床形状偏差を推定する処理（床形状推定器130の処理）が追加される。さらに、S38'では、前記第2参考例で説明した各補償角 $\theta_{145236}$ 、 $\theta_{145}$ 、 $\theta_{236}$ とS37で推定された床形状偏差とに応じて各目標接地部位位置姿勢が修正され、その修正後の目標接地部位位置姿勢をさらに機構変形補償量に応じて修正することにより、最終的な目標接地部位位置姿勢たる機構変形補償入り修正目標接地部位位置姿勢が得られる。この場合、より詳しくは、各補償角 $\theta_{145236}$ 、 $\theta_{145}$ 、 $\theta_{236}$ に応じて第2参考例と同様に修正目標接地部位位置姿勢を求めた後、その修正目標接地部位位置姿勢が床形状偏差に応じて修正され、さらに、これが機構変形補償量に応じて修正されることで、機構変形補償入り修正目標接地部位位置姿勢が得られる。上記した事項以外は、図9の処理と同じである。

以降、本参考例の第2参考例と相違する点を具体的に説明する。

まず、本参考例の詳細な説明に入る前に、床形状推定器130が推定する上で使用する概念と用語を以下のように定義する。なお、ここでの説明は、便宜上、本参考例の6脚ロボット1に限らずに、一般的なロボットの簡略的な図を使用して行なう。

図37、図38および図39に示すように、目標歩容において想定された床（あるいは床面）を「想定床」と呼ぶ。ロボットが移動する実際の床を「実床」と呼ぶ。なお、説明の便宜上、図37では第1参考例で説明した4脚ロボットを図示し、図38および図39では、2脚ロボットを図示しているが、以下に説明する用語の意味は、本参考例における6脚ロボット1を含む任意の多脚ロボットにおいても同様である。

前記第 1 および第 2 参考例で説明した階層型コンプライアンス制御において定義された目標第  $n$  接地部位床反力中心点  $Q_n$  は、第  $n$  接地部位の中心点に設定された点であったが、その床反力中心点  $Q_n$  は、該第  $n$  接地部位の接地面（底面）に設定されていてもよい。この場合、目標歩容において、目標第  $n$  接地部位床反力中心点  $Q_n$  と接することが想定された想定床面上の点を「想定第  $n$  床接点  $D_n$ 」と呼ぶ。

この定義から明らかなように、ロボットの目標歩容において第  $n$  接地部位が接地している時期では、目標第  $n$  接地部位床反力中心点  $Q_n$  と想定第  $n$  床接点  $D_n$  とは、支持脚座標系（グローバル座標系）から見て同一座標になる。これに対し、実際にロボット 1 が移動しているときに、実第  $n$  接地部位の底面上における目標第  $n$  接地部位床反力中心点  $Q_n$  に対応する点が、実床に接触する点を「実第  $n$  床接点  $D_{nact}$ 」と呼ぶ。

これらの点の関係を表す例を図 3 7、図 3 8 および図 3 9 に示す。尚、図 3 7 は 4 脚ロボットを、目標第 1 接地部位床反力中心点  $Q_1$  と目標第 2 接地部位床反力中心点  $Q_2$  とを通る垂直面の法線方向から（すなわちほぼ側方から）見た図、図 3 8 は移動（歩行）している 2 脚ロボットを目標第 1 接地部位床反力中心点  $Q_1$  と目標第 2 接地部位床反力中心点  $Q_2$  とを通る垂直面の法線方向から（すなわちほぼ側方から）見た図、図 3 9 はほぼ直立姿勢の 2 脚ロボットを目標第 1 接地部位床反力中心点  $Q_1$  と目標第 2 接地部位床反力中心点  $Q_2$  とを通る垂直面の法線方向から（すなわちほぼ背面から）見た図である。

これらの図 3 7 ～図 3 9 には、前記垂直面における想定床の断面が細線で示され、前記垂直面における実床の断面が太線で示されている。なお、図 3 7 では、ロボットの目標姿勢（目標歩容の瞬時値におけるロボットの全体的な姿勢）と、実姿勢とがそれぞれ破線、実線で示されている。また、図 3 8 および図 3 9 では、ロボットの目標姿勢（目標歩容の

瞬時値におけるロボットの全体的な姿勢)と、実接地部位位置姿勢とがそれぞれ細線、太線で示されている。これらの状況における実第 $n$ 床接点は、実床面上の点であり、図37、図38および図39に示す位置になる。

- 5 想定床面に対する実床面の形状偏差を床形状偏差と呼ぶ。床形状偏差を定量的に表現する指標として、第 $n$ ノード床高さ偏差、第 $n$ ノード床傾斜偏差を以下のように定義する。

- 第 $n$ 床接点における床面の高さを「第 $n$ 接地部位床高さ」と呼ぶ。葉である第 $n$ ノードに対して、実第 $n$ 接地部位床高さと想定第 $n$ 接地部位床高さとの差を「第 $n$ 接地部位床高さ偏差」あるいは、「第 $n$ ノード床高さ偏差」と呼ぶ。第 $n$ 床接点における床面の傾斜を「第 $n$ 接地部位床傾斜」と呼ぶ。葉である第 $n$ ノードに対して、実第 $n$ 接地部位床傾斜と想定第 $n$ 接地部位床傾斜との差を「第 $n$ 接地部位床傾斜偏差」あるいは、「第 $n$ ノード床傾斜偏差」と呼ぶ。接地部位床傾斜偏差の例を図39に示す。

- 葉ノードである、あらゆる第 $j$ ノードに対して、目標第 $j$ 接地部位位置姿勢と想定第 $j$ 床面の高さと傾斜(詳しくは、想定第 $j$ 床接点における想定床面の高さと傾斜)の関係と、ノード補償角の組を用いたコンプライアンス動作によって修正された修正目標第 $j$ 接地部位位置姿勢と実第 $j$ 床面の高さと傾斜(詳しくは、実第 $j$ 床接点における実床面の高さと傾斜)の関係とが一致するためのノード補償角の組を「ノード床傾斜偏差(の組)」と呼び、このうちの第 $n$ ノード補償角に対応するノード床傾斜偏差の成分を「第 $n$ ノード床傾斜偏差」と呼ぶ。このように定義した「第 $n$ ノード床傾斜偏差」は、第 $n$ ノードが葉ノードである場合、先に上記で葉ノードに関して定義した「第 $n$ ノード床傾斜偏差」(=実第 $n$ 接地部位床傾斜と想定第 $n$ 接地部位床傾斜との差)に一致するもの

である。

結局、ノード床傾斜偏差の組は、目標歩容通りに移動しているロボットの全ての接地部位を、目標床面に平行になっている状態から、実床面に平行にさせるために必要な補償量に相当する。

- 5 従って、歩行中に床形状偏差を推定し、推定した床形状偏差を目標接地部位位置姿勢に加えれば、床形状偏差があっても、各ノードの実床反力モーメントは想定床を歩行しているときと同一になる。当然、葉ノードの実床反力モーメントである接地部位の実床反力モーメントも目標接地部位床反力モーメントに一致する。
- 10 通常は、上記のごとく定義される「第  $n$  ノード床傾斜偏差」を用いて床形状を表現して構わないが、あるノードが3つの子ノードを持ち、3つの子ノードの目標床反力中心点が同一直線上に並ぶ場合や、あるノードが4つ以上の子ノードを持つ場合などでは、床形状を表現することが困難になる。
- 15 そこで、以降の説明においては、葉でない第  $n$  ノードに対しては、より一般的に適用できる以下の表現を用いることとする。以下の定義における所定の重み付き平均を求めるために用いる重みは、前記目標床反力分配器 102 が前記した如く決定した前述の重みと同一のものとする。
- 20 定義：
- すべての目標接地部位の高さと傾斜を、それぞれ対応する実床面の高さと傾斜に一致させ、かつ、任意のノードの目標床反力中心点をそのすべての子ノードの目標床反力中心点の所定の重み付き平均（すなわち所定の内分比による内分点）で表したときに、任意の第  $n$  ノードに対し、第
- 25  $n$  ノードの目標床反力中心点の高さ（鉛直方向位置）から第  $n$  ノードの親ノードの目標床反力中心点の高さ（鉛直方向位置）を減じた高さを



「実第  $n$  ノード相対床高さ」と呼ぶ。

定義：

すべての目標接地部位の高さと傾斜を、それぞれ対応する想定床面の高  
5 さと傾斜に一致させ、かつ、任意のノードの目標床反力中心点をそのす  
べての子ノードの目標床反力中心点の所定の重み付き平均（すなわち所  
定の内分比による内分点）で表したときに、任意の第  $n$  ノードに対し、  
第  $n$  ノードの目標床反力中心点の高さ（鉛直方向位置）から第  $n$  ノード  
の親ノードの目標床反力中心点の高さ（鉛直方向位置）を減じた高さを  
10 「想定第  $n$  ノード相対床高さ」と呼ぶ。

実第  $n$  ノード相対床高さから想定第  $n$  ノード相対床高さを減じた高さを  
「第  $n$  ノード相対床高さ偏差」と呼ぶ。第  $n$  ノード相対床高さ偏差は、  
以下のように定義しても、同一値となる。

15 定義：

すべての目標接地部位の高さと姿勢を、それぞれ対応する接地部位床高  
さ偏差と接地部位床傾斜偏差に一致させ、かつ、任意のノードの目標床  
反力中心点をそのすべての子ノードの目標床反力中心点の所定の重み付  
き平均（すなわち所定の内分比による内分点）で表したときに、任意の  
20 第  $n$  ノードに対し、第  $n$  ノードの目標床反力中心点高さから第  $n$  ノード  
の親ノードの目標床反力中心点高さを減じた高さを「第  $n$  ノード相対床  
高さ偏差」と呼ぶ。

上記した第  $n$  ノード相対床高さ偏差の定義から明らかなように、子ノ  
ードを持つ各ノードに対し、その全ての子ノードの第  $n$  ノード相対床高  
25 さ偏差は、床高さ偏差の相対関係を表すものとなる。また、子ノードを  
持つ各ノードに対し、その全ての子ノードの重み付き平均値は 0 となる。

本参考例（第3参考例）では、実床面と目標歩容上での想定床面とのずれ（すなわち床形状偏差）を補償して、接地すべき接地部位10を適正に実床面に接地させるように各接地部位10の目標位置姿勢の修正を行なう。そして、本参考例では、上記のように定義される第 $n$ ノード相

5 対床高さ偏差を床形状偏差を表す床形状パラメータとして用い、これを基に、各第 $n$ 接地部位床高さ偏差（床形状偏差）を推定する。そして、推定した各第 $n$ 接地部位床高さ偏差（以下、単に第 $n$ 床高さ偏差ということがある）に応じて第 $n$ 接地部位10の目標位置を修正するようにした。

10 以上を前提として、以下に本参考例の要部の詳細を説明する。

図35に示した階層型コンプライアンス動作決定部114の床形状推定器130への入力は、一般的には大きく分けて以下のようなになる。

1) 各目標床反力中心点（目標全床反力中心点 $P$ 、目標第 $n$ 接地部位床反力中心点 $Q_n(n=1,2,3,4,5,6)$ ）。

15 2) 想定床面形状（想定第 $n$ 床接点の座標、想定第 $n$ 接地部位床傾斜）。

3) 最終的に実ロボットが追従すべき目標姿勢（機構変形入り修正目標接地部位位置姿勢）または実関節変位またはこれらの周波数重み付き平均（周波数特性を持つ重みによる重み付き平均）。

4) 上体姿勢傾斜偏差。

20 5) 実床反力（実第 $n$ 接地部位床反力の並進力成分とモーメント成分）。

なお、本参考例におけるロボット1では、各接地部位10の姿勢を制御できないので、想定床面形状のうちの、想定第 $n$ 接地部位傾斜は不要である。

また、本参考例におけるロボット1では、実床反力のうちの実第 $n$ 接地部位床反力のモーメント成分は0になるので、これも床形状推定器130に

25 入力する必要は無い。ただし、以降の本参考例の説明では、各接

地部位 10 の姿勢を制御できる場合も考慮し、第  $n$  接地部位床反力には、一般に、実第  $n$  接地部位床反力のモーメント成分も含まれるものとする。

また、以降の説明では、接地部位の個数が 4 個や 6 個以外の場合にも容易に本参考例を拡張的に適用できるように、接地部位の総数をしばしば

5 「最終葉ノード番号」と表す。例えば図 1 の 6 脚ロボット 1 では、最終葉ノード番号は、「6」である。

図 40 は、床形状推定器 130 の処理機能を示すブロック図である。

図 40 に示す床形状推定器 130 を構成する各機能要素について説明すると、床形状推定器 130 は機構コンプライアンスモデル 134 を備える。

機構コンプライアンスモデル 134 は、各接地部位 10 が実床反力  $F_{n\_act}(n=1,2,\dots,\text{最終葉ノード番号})$  を受けたときの各脚 # 1 ~ # 6 のコンプライアンス機構 42 など（各脚のコンプライアンス機構 42 およびリンク機構）の変形量を求め、求めた変形量を、前記ロボット幾何学モデル 110（図 2 参照）への入力である各機構変形補償入り修正目標  
15 接地部位位置姿勢に加えることにより、機構変形後の第  $n$  接地部位（各接地部位）の位置姿勢の推定値（より詳しくは、実上体姿勢が目標上体姿勢に一致していると仮定した場合の第  $n$  接地部位位置姿勢の推定値）である推定第  $n$  接地部位位置姿勢( $n=1,2,\dots,\text{最終葉ノード番号}$ )を求める。

20 なお、このときに用いる各機構変形補償入り修正目標接地部位位置姿勢は、前回制御周期で求めた値などの過去値である。

機構変形後の各推定接地部位位置姿勢を求める際に、ロボット 1 の関節変位の制御の追従遅れが無視できない場合には、機構変形補償入り修正目標接地部位位置姿勢をそのまま用いる代わりに、機構変形補償入り  
25 修正目標接地部位位置姿勢を、追従遅れに相当するローパスフィルタに通してなる位置姿勢を用いれば良い。

あるいは、ロボット1の実関節変位の検出値からロボット幾何学モデル（図2のロボット幾何学モデル110と同様のモデル）を介して機構変形が無い場合の実接地部位位置姿勢である機構変形なし実接地部位位置姿勢を求め、求めた値を機構変形補償入り修正目標接地部位位置姿勢の代わりに用いれば良い。

あるいは、周波数重み（周波数特性を持つ重み）を用い、前記機構変形なし実接地部位位置姿勢と機構変形補償入り修正目標接地部位位置姿勢の重み付き平均を求め、それを機構変形補償入り修正目標接地部位位置姿勢の代わりに用いれば良い。

10 厳密には、前記した機構変形なし実接地部位位置姿勢を用いるべきであるが、関節変位制御の能力が高ければ、上記のいずれを用いても大差はない。

15 なお、機構コンプライアンスモデル134については、本出願人が先に提案した特開平10-277969号公報において詳細が説明してあるので、ここではこれ以上の説明を省略する。

補足すると、図2においてロボット幾何学モデル110への入力に機構変形補償が含まれない場合、すなわち、機構変形補償のない修正目標接地部位位置姿勢（前記修正目標接地部位位置姿勢算出部114gで求められる位置姿勢）をロボット幾何学モデル110に入力する場合には、  
20 その機構変形補償のない修正目標接地部位位置姿勢を床形状推定器130の機構コンプライアンスモデル134に入力すれば良い。

図40の説明に戻ると、次いで、機構変形後の推定各接地部位位置姿勢( $n=1,2,\dots,6$ )を、目標全床反力中心点Pを回転中心として前記上体姿勢傾斜偏差 $\theta_{berr}$ だけ回転移動させることにより、グローバル座標系（支持脚座標系）から見た機構変形後の第n推定接地部位位置姿勢  
25 ( $n=1,2,\dots$ ,最終葉ノード番号)を求める。次いで、グローバル座標系から

見た機構変形後の第  $n$  推定接地部位位置姿勢 ( $n=1, 2, \dots$ , 最終葉ノード番号) と第  $n$  接地部位の目標接地部位位置 (第  $n$  接地部位の代表点の目標位置) から見た目標第  $n$  接地部位床反力中心点の位置とを基に、グローバル座標系から見た機構変形後の目標第  $n$  接地部位床反力中心点に対応する点の位置を求める。そして、この求めた点の位置を瞬間推定床接点位置 (瞬間推定第  $n$  床接点位置)  $Q_{n\_estm'}$  とする。この  $Q_{n\_estm'}$  は、実第  $n$  床接点の瞬時位置の推定値に相当するものである。尚、瞬間推定床接点位置  $Q_{n\_estm'}$  の求め方の詳細は、特開平 10-277969 号公報中の式 21 の  $Q''$  を求めることに相当するので、ここではこれ以上の説明を省略する。

次いで、瞬間推定第  $n$  床接点位置  $Q_{n\_estm'}$  から想定第  $n$  床接点位置  $D_n$  を減じたものを、バイアス含有瞬間第  $n$  接地部位床高さ偏差  $Z_{fn\_with\_bias'}$  として得る。この  $Z_{fn\_with\_bias'}$  は、第  $n$  接地部位床高さ偏差の瞬時推定値に相当するものであるが、本参考例のように上体の実高さを検出しない場合には、一般にバイアス誤差を含んでいる。そのため、 $Z_{fn\_with\_bias'}$  をバイアス含有瞬間第  $n$  接地部位床高さ偏差と呼ぶ。

ここで、想定第  $n$  床接点  $D_n$  は、先に定義したように、第  $n$  接地部位が接地している時期においては、目標第  $n$  接地部位床反力中心点  $Q_n$  と同一位置とする。目標歩容において第  $n$  接地部位が接地する直前の時期では、次に接地する時に想定されている目標第  $n$  接地部位床反力中心点  $Q_n$  の位置を想定第  $n$  床接点  $D_n$  とする。目標歩容において第  $n$  接地部位が離床した直後の時期では、離床時に想定されていた目標第  $n$  接地部位床反力中心点  $Q_n$  の位置を想定第  $n$  床接点  $D_n$  とする。

次いで、バイアス含有瞬間第  $n$  接地部位床高さ偏差  $Z_{fn\_with\_bias'}$  ( $n=1, 2, \dots$ , 最終葉ノード番号) と第  $n$  接地部位床反力

$F_{n\_act}$  ( $n=1,2,\dots$ ,最終葉ノード番号) とを基に、図41のフローチャートで示す床高さ偏差推定処理サブルーチンによって、推定第 $n$ ノード床高さ偏差  $Z_{fn\_estm}$  ( $n=1,2,\dots$ ,最終葉ノード番号) を求める。

ここで、床高さ偏差推定処理サブルーチン等に用いられる「階層相対化処理」(または「階層相対化」) について説明する。

階層相対化処理とは、一般的に定義すると、すべての葉ノードに対する入力値(ある所定種類の状態量の値)の組に対して、すべてのノードの出力値を決定する処理である。より詳しくは、階層相対化処理は、葉ノードでない任意のノードのすべての子ノードに対応する出力値の重み付き平均が0であり、かつ、任意の葉ノードの入力値(状態量)が、そのノードの出力値とそのノードのすべての先祖ノードの出力値との和に一致するように各ノード出力値を決定する処理のことである。

以降、葉ノードに対するある種類の入力(状態量)  $AA$  から、階層相対化処理によってある種類の出力  $BB$  の値を求めることを、「 $AA$  を階層相対化して  $BB$  を求める」と言う。

以下に階層相対化処理のアルゴリズムを説明する。一般的に、階層相対化処理の入力を第 $n$ 接地部位高さ  $Z_{fn}$  ( $n$ は葉ノード番号)、出力を第 $n$ ノード相対高さ  $Z_{n\_rel}$  ( $n=1,2,\dots$ ,最終ノード番号)とする。なお、「最終ノード番号」は、全てのノード番号のうちの最大番号を意味し、例えば第2参考例で説明した階層構造では、最終ノード番号=145236である。また、このアルゴリズムの説明では、「第 $n$ 接地部位高さ」は、前記第 $n$ 接地部位床高さ、あるいは第 $n$ 接地部位床高さ偏差など、階層相対化処理の入力を総称的に表した名称であり、「第 $n$ ノード相対高さ」は、後述する第 $n$ 接地部位相対床高さ偏差など、階層相対化処理の出力を総称的に表した名称である。

まず、バイアス含有第 $n$ ノード高さ  $Z_{n\_with\_bias}$  を以下のように決

定する。すなわち、第  $n$  ノードが葉ノード（すなわち接地部位）であるならば、バイアス含有第  $n$  ノード高さ  $Z_{n\_with\_bias}$  に第  $n$  接地部位高さ  $Z_{fn}$  の値を代入する。第  $n$  ノードが葉ノード（すなわち接地部位）でないならば、第  $n$  ノードのすべての子ノードのバイアス含有第  $n$  ノード高さ  $Z_{n\_with\_bias}$  の重み付き平均を求め、これをもってバイアス含有第  $n$  ノード高さ  $Z_{n\_with\_bias}$  とする。ただし、各子ノードに対する重みには、前記目標床反力分配器 102 が決定した重み  $W_j (j=1, 2, \dots)$  を用いる。

すなわち、以下の式 32 によって、バイアス含有第  $n$  ノード高さ  $Z_{n\_with\_bias}$  を得る。

第  $n$  ノードが葉ノードである場合、

$$Z_{n\_with\_bias} = Z_{fn}$$

第  $n$  ノードが葉ノードでない場合、

$$Z_{n\_with\_bias} = \sum (Z_{j\_with\_bias} * W_j)$$

ただし、 $\sum$  は  $j \in \{\text{第 } n \text{ ノードの子ノード番号の集合}\}$  である  $j$  についての総和。

…式 32

以上のルールに従って、すべてのノードに対してバイアス含有ノード高さ  $Z_{n\_with\_bias}$  ( $n=1, 2, \dots$ , 最終ノード番号)を求める。

最後に、第  $n$  ノードの親ノード（これは第  $h$  ノードであるとする）のバイアス含有高さ  $Z_{h\_with\_bias}$  をバイアス含有第  $n$  ノード高さ  $Z_{n\_with\_bias}$  から減じることにより、第  $n$  ノード相対高さ  $Z_{n\_rel}$  を求める。

すなわち、次式 33 により第  $n$  ノード相対高さ  $Z_{n\_rel}$  を求める。た

100

だし、第  $h$  ノードは、第  $n$  ノードの親ノードであるとする。

$$Zn\_rel = Zn\_with\_bias - Zh\_with\_bias \quad \dots \text{式 3 3}$$

- 5      以上のルールに従って、すべてのノードに対してノード相対床高さ  $Zn\_rel$  ( $n$  は各ノードの番号) を求める。ただし、根ノードに対するノード相対高さ  $Zk\_rel$  ( $k$  は根ノードの番号) は 0 とする。図 4 2 に第 1 参考例で示した 4 脚ロボットのノード相対高さの算出例を示し、図 4 3 に本参考例における 6 脚ロボットのノード相対高さの算出例を示す。
- 10      バイアス含有第  $n$  ノード高さ  $Zn\_rel\_with\_bias$  は、同一の結果が得られる以下の方法によって求めても良い。

- 第  $n$  ノードが葉ノード (すなわち接地部位) であるならば、バイアス含有第  $n$  ノード高さ  $Zn\_with\_bias$  に第  $n$  接地部位高さ  $Zfn$  の値を代入する。第  $n$  ノードが葉ノード (すなわち接地部位) でないならば、
- 15      第  $n$  ノードのすべての子孫の葉ノードのバイアス含有高さの重み付き平均を求め、これをもってバイアス含有第  $n$  ノード高さ  $Zn\_with\_bias$  とする。ただし、ここでの各葉ノード  $j$  に対する重み  $Wj'$  は、そのノード  $j$  に対して前記目標床反力分配器 102 が決定した重み  $Wj$  とそのノード  $j$  の祖先ノードかつ第  $n$  ノードの子孫ノードであるすべてのノード
- 20      に対して前記目標床反力分配器 102 が決定した重みとの積とする。

すなわち、以下の式 3 4 によって、バイアス含有第  $n$  ノード高さ  $Zn\_with\_bias$  を得る。

第  $n$  ノードが葉ノードであるならば、

$$25 \quad Zn\_with\_bias = Zfn$$

第  $n$  ノードが葉ノードでないならば、



1 0 1

$$Z_{n\_with\_bias} = \Sigma (Z_{j\_with\_bias} * W_j')$$

ただし、 $\Sigma$ は  $j \in \{\text{ノード } n \text{ の子孫の葉ノード番号の集合}\}$  である  $j$  についての総和。

…式 3.4

5

補足すると、この場合の重み  $W_j'$  は、目標第  $j$  ノード床反力が 0 でなければ、各葉ノードの目標床反力を目標第  $j$  ノード床反力で割った値に一致する。

以上が階層相対化処理である。

- 10 次いで、床高さ偏差の推定処理のサブルーチン処理を、それを示す図 4 1 のフローチャート等を用いて以下に説明する。なお、この処理では、階層相対化処理の入力として、第  $n$  接地部位床高さ偏差を用い、出力を第  $n$  ノード相対床高さ偏差とする。そして、これらの入力および出力の参照符号として、前記式 3 2 ~ 3 4 などに示したものと同様の符号を使用する。
- 15

図 4 1 を参照して、まず、S 5 0 において、前記バイアス含有瞬間第  $n$  接地部位床高さ偏差  $Z_{fn\_with\_bias}'$  を階層相対化して瞬間第  $n$  ノード相対床高さ偏差  $Z_{n\_rel}'$  ( $n=1,2,\dots$ , 最終ノード番号) を求める。

- 20 次いで、S 5 2 において、制御装置 5 0 の前回制御周期で求めた、第  $n$  接地部位床高さ偏差の推定値である推定第  $n$  接地部位床高さ偏差 (以降、これを前回推定第  $n$  接地部位床高さ偏差  $Z_{fn\_estm\_p}$  と呼ぶ) を階層相対化して得られる出力を前回推定第  $n$  ノード相対床高さ偏差  $Z_{n\_rel\_estm\_p}$  ( $n=1,2,\dots$ , 最終ノード番号) として求める。ただし、この
- 25 階層相対化処理で使用する各ノードの重みには、制御装置 5 0 の今回 (現在) の制御周期で前記目標床反力分配器 1 0 2 が決定した重み

$W_n(n=1,2,\dots,\text{最終ノード番号})$ を用いる。

補足すると、一般的に、今回の制御周期で決定された重み（以下、今回重みという）と前回の制御周期で決定された重み（以下、前回重みという）とが異なる場合には、実際の床の形状に変化がなくても、前回重みを用いて求めた各ノードの前回推定相対床高さ偏差の値と今回重みを用いて求めた各ノードの前回推定相対床高さ偏差の値とは異なる値になってしまう。そこで、前回の制御周期で求めた各ノードの推定相対床高さ偏差をそのまま各ノードの前回推定ノード相対床高さ偏差として用いず、上記のごとく、今回重みを用いて各ノードの前回推定ノード相対床高さ偏差を改めて計算するようにした。

次いで、S 5 4において、次式 3 5により、第  $n$  ノード相対床高さ偏差補正量候補値  $Zn\_inc\_cand(n=1,2,\dots,\text{最終ノード番号})$ を求める。この  $Zn\_inc\_cand$  は、第  $n$  ノード相対床高さ偏差を今回の制御周期で更新するときの該偏差の補正量の仮値を意味するものである。

この場合、第  $n$  ノード相対床高さ偏差補正量候補値  $Zn\_inc\_cand$  は、次式 3 5に示す如く、瞬間第  $n$  ノード相対床高さ偏差  $Zn\_rel'$ と前回推定第  $n$  ノード相対床高さ偏差  $Zn\_rel\_estm\_p$  の差と所定の係数  $(\Delta T/(Testm + \Delta T))$ との積に設定される。

$$Zn\_inc\_cand = (Zn\_rel' - Zn\_rel\_estm\_p) \\ * \Delta T / (Testm + \Delta T)$$

…式 3 5

ここで、式 3 5中の  $Testm$  は第  $n$  ノード床高さ偏差の推定（更新）における時定数（一次遅れの時定数）であり、 $\Delta T$ は制御装置 5 0の制御周期である。

このように、 $Zn\_inc\_cand$  は設定したとき、制御装置 5 0の制御周期

毎に、Zn\_inc\_cand を Zn\_rel\_estm\_p に加算していくことで、その加算結果の値は、徐々に Zn\_rel' に近づいていくように変化する。

次いで、S 5 6 において、目標歩容の時期に応じて各ノードのモードの要求値であるノード要求モード（第 n 要求モード mdn\_dmd）を決定する。

具体的には、前記 6 脚口ボット 1 においては、第 n ノード要求モード（n=1,2,3,4,5,6）、第 145 ノード要求モード md145dmd、第 236 ノード要求モード md236dmd および第 145236 ノード要求モード md145236dmd を、目標歩容の時間経過に対して図 4 4 のタイミングチャートで示すように設定し、これにしたがって現在の要求モードを決定する。ただし、歩容が異なれば、それに応じてノード要求モードのパターンも変えるべきである。なお、図 4 4 の第 1 段（最上段）および第 2 段のタイミングチャートにおける ON/OFF は、接地部位が接地している状態が ON に対応しており、接地していない状態が OFF に対応している。

補足すると、本願出願人が、特開平 10-277969 号公報に示したように、接地部位として足平を持ち、接地部位における床傾斜偏差を推定することができるロボットの場合には、接地部位の床傾斜偏差推定に対応する要求モードも、同公報に説明されているように設定すべきである。

図 4 4 に示すように、各ノードのモード（以下、単にノードモードという）には、準備完了モード、ホールドモード、およびリセットモードがある。

準備完了モードは、床形状の推定を行なうモードである。ホールドモードは、床形状の推定値（推定第 n 接地部位床高さ偏差）をホールドする（直前の値を維持する）モードである。ホールドモードは、床形状推

定値が発散する恐れがある時期と、床形状推定値の精度が低下する恐れがある時期に存在させる。また、リセットモードは、床形状推定値を、次の床形状の推定を開始する（次の準備完了モードの開始）までに所定の初期値に移行させるモードである。

- 5 葉ノードである第  $n$  ノード ( $n=1,2,3,4,5,6$ ) に対しては、目標歩容上で第  $n$  接地部位が接地しているならば（すなわち目標第  $n$  接地部位床反力が 0 でないならば）、第  $n$  ノード要求モードは、準備完了モードに設定される。その後、目標歩容上で第  $n$  接地部位が離床した（すなわち目標第  $n$  接地部位床反力が 0 になった）ならば、その直後は第  $n$  ノード要求モードがホールドモードに設定される。そして、その後しばらくしたら第  $n$  ノード要求モードがリセットモードに設定される。さらに、目標歩容上で第  $n$  接地部位が接地する直前から、第  $n$  ノード要求モードが準備完了モードに設定される。

- 15 また、葉ノードでない第  $n$  ノード ( $n=145,236,145236$ )、すなわち、子ノードをもつ第  $n$  ノードに対しては、その第  $n$  ノードに属する少なくとも 1 つの接地部位が目標歩容上で接地している場合には、第  $n$  ノード要求モードは、準備完了モードに設定される。その後、目標歩容上で第  $n$  ノードに属するすべての接地部位が離床したならば、その直後までは、第  $n$  ノード要求モードがホールドに設定される。なお、第  $n$  ノードに属するすべての接地部位が離床する直前から第  $n$  ノード要求モードをホールドモードに設定するようにしてもよい。そして、その後しばらくしたら第  $n$  ノード要求モードがリセットモードに設定される。さらに、目標歩容上で第  $n$  ノードに属する少なくとも 1 つの接地部位が接地する直前から、第  $n$  ノード要求モードが準備完了モードに設定される。

- 25 次いで、S 58において、推定許可条件を満足するか否かを判定し、その判定結果とノード要求モードに基づき各ノードのモードを最終的に

決定する。決定される各ノードのモードは、前記準備完了モード、ホールモード、およびリセットノードのいずれかである。前記ノード要求モードは、目標歩容上での各接地部位の接地、非接地に応じて決定したものであったが、S 58では、各接地部位の実際の接地、非接地などを考慮して、各ノードのモードが決定される。

推定許可条件とは、以下のいずれかの式36、37を満足することである。この場合、式36、37のいずれも満足しないときには、推定許可条件が成立しないとする。

$$10 \quad F_{n\_act\_z} > F_{n\_min} \quad \dots \text{式 3 6}$$

$$Z_{n\_rel} < Z_{n\_rel\_estm\_p} \quad \dots \text{式 3 7}$$

ここで、 $F_{n\_act\_z}$  は、実第  $n$  接地部位床反力 ( $n=1, 2, \dots$ , 最終葉ノード番号) の並進力鉛直成分である。

15

推定許可条件とは、第  $n$  ノード相対床高さ偏差を推定しても（床形状偏差を推定しても）、その推定値が発散しない条件である。ここで発散とは、後述するごとく推定された推定第  $n$  床高さ偏差  $Z_{fn\_estm}$ （床形状偏差の推定値）を用いて、実際の第  $n$  床高さ偏差の影響を打ち消すように修正目標接地部位位置姿勢を修正する補正動作を行った場合に、推定第  $n$  床高さ偏差  $Z_{fn\_estm}$  が増加し続け、第  $n$  接地部位が床から離れて行く（床からさらに浮いていく）状況を意味する。

20

$Z_{fn\_estm}$  の推定が理想的に実行されるならば、所定の許容値  $F_{n\_min}$  は、0で良いが、実際には  $F_{n\_act}$  の検出誤差が生じ、それにより推定値が発散する場合がある。それを防ぐために、 $F_{n\_min}$  は、 $F_{n\_act}$  の検出誤差よりも十分に大きい値に設定する。

25

本参考例では、推定許可条件とは、以上に述べた発散が生じない条件である。ただし、推定許可条件は、床形状の所要の推定精度を確保できる条件であってもよい。従って、実第  $n$  接地部位床反力  $F_{n\_act}$  の並進力鉛直成分の代わりに、実第  $n$  接地部位床反力  $F_{n\_act}$  の並進力成分の  
5 内の想定床面（あるいは推定床面（推定した実床面））に垂直な成分を用いても良い。

なお、床形状偏差（実床面と想定床面との形状偏差）を推定するだけで歩行動作に反映しない場合、すなわち、床形状偏差の推定値を用いて床形状偏差の影響を打ち消すように修正目標接地部位位置姿勢を修正し  
10 ない場合には、床形状偏差の推定値が発散することはない。

推定許可条件を満足するか否かの判定結果とノード要求モードに基づき各ノードのモードを決定する。

第  $n$  ノード要求モードが準備完了モードであり、かつ、推定許可条件  
15 を満足するならば、第  $n$  ノードモードを準備完了モードとする。

第  $n$  ノード要求モードが準備完了モードであり、かつ、推定許可条件を満足しないならば、第  $n$  ノードモードをホールドモードとする。

第  $n$  ノード要求モードがホールドモードであるならば、第  $n$  ノードモードをホールドモードとする。

20 第  $n$  ノード要求モードがリセットモードであるならば、第  $n$  ノードモードをリセットモードとする。

従って、第  $n$  ノードのモードは、要求モードが準備完了モードであり、且つ、推定許可条件を満足する場合に限って、最終的に準備完了モード  
25 の決定される。

次いで、S 60～S 70において、すべてのノードに対し、ノードに

対応する第  $n$  ノード相対床高さ偏差( $n=1,2,\dots$ ,最終ノード番号)を推定する。

補足すると、特開平 10-277969 号公報に示したように、姿勢を制御可能な接地部位（足平）を持ち、接地部位における床傾斜偏差を推定することができるロボットの場合には、接地部位に対応した床傾斜偏差も推定することが望ましい。

このため、S60～S70 の処理は、接地部位の姿勢を制御可能な場合でも、床形状偏差の推定を行なうことができるように構成されている。

以下に S60～S70 の処理を具体的に説明すると、S62 において、  
10 第  $n$  ノードの子ノードの個数を判定する。このとき、子ノード数（子ノードの個数）が 2 個の場合には、S64 において、その個数に対応した床形状偏差の推定処理である 2 子ノード用床形状推定処理が行なわれる。また、子ノード数が 3 個の場合には、S66 において、その個数に対応した床形状偏差の推定処理である 3 子ノード用床形状推定処理が行  
15 なわれる。また、子ノード数が 0 個の場合には、S68 において、該第  $n$  ノードの接地部位が床反力モーメントを制御できるか否かを判定する。

子ノード数が 0 の場合の処理についてさらに説明すると、第  $n$  ノードの子ノード数が 0 の場合、第  $n$  ノードは葉ノードであり、第  $n$  ノードは接地部位に対応している。この場合、上記の如く S68 において、まず、  
20 第  $n$  接地部位が床反力モーメントを制御できるか否かを判定する。ここで、例えば、通常の 2 足歩行ロボットのように、接地部位として姿勢を制御可能な足平を持ち、脚にフリージョイントを含まないロボットの場合には、接地部位で床反力モーメントを発生することができる。ただし、本参考例のロボット 1（6 脚ロボット）においては、各接地部位 10 が  
25 フリージョイントである球関節 12 に係合しているため、いずれの接地部位 10 も床反力モーメントを発生することができない。この場合には、

子ノード数が0である第nノードに対する処理は実行されない。

一方、S68において、床反力モーメントを制御できると判定された場合には、S70において、接地部位床傾斜偏差推定処理が行なわれる。この処理は、各接地部位における床傾斜偏差を推定する処理である。この処理は、本出願人が先に提案した特開平10-277969号公報の中の床傾斜推定処理における足平床反力中心点を本参考例における第n接地部位の目標床反力中心点に置き換えた処理である。したがって、本明細書では、これ以上の詳細説明を省略する。

次に、前記2子ノード用床形状推定処理を図45～図48を参照して説明する。図45は2子ノード用床形状推定処理のサブルーチン処理を示すフローチャート、図46、図47はそれぞれ図45のS6404、S6408のサブルーチン処理を示すフローチャート、図48は図45のS6406およびS6410のサブルーチン処理を示すフローチャートである。

2子ノード用床形状推定処理では、図45のフローチャートに示されるように、S6400において、2個の子ノードをもつ第nノードのすべての子ノードのモード（図41のS58で決定されたモード）が判断される。その判断結果は、「すべて準備完了」、「すべてリセット」、および、「その他（else）」の3つに分けられる。なお、以降の説明では、第nノードの2個の子ノードを第iノード、第jノードとする。

ここで、子ノードのモードが「すべて準備完了」と判断すると、S6402において、第nノードの子ノードの実ノード床反力の並進力鉛直成分  $F_{i\_act\_z}$ 、 $F_{j\_act\_z}$  の合力  $F_{n\_z}$  ( $=F_{i\_act\_z}+F_{j\_act\_z}$ ) が所定の値  $F_{n\_min2}$  より大きいかな否かを判断する。 $F_{n\_z}$  は、換言すれば、第nノードに属する全ての接地部位の実床反力の合力の並進力鉛直成分である。



S 6 4 0 2 の判断結果が Y E S である場合には、S 6 4 0 4 において、2つの子ノードを持つノード用のグループ内全推定処理（第 n ノードが持つ2つの子ノードのそれぞれのノード相対床高さ偏差を実質的に推定する処理）を行なう。この処理では、図 4 6 のフローチャート中に示す式に従って第 n ノードの2つの子ノードである第 i ノードおよび第 j ノードのそれぞれの推定ノード相対床高さ偏差  $Zi\_rel\_estm$ 、 $Zj\_rel\_estm$  が求められる（更新される）。すなわち、 $Zi\_rel\_estm$  について代表的に説明すると、 $Zi\_rel\_estm$  の前回制御周期での値  $Zi\_rel\_estm\_p$  に、前記 S 5 4 で求めた第 j ノード相対床高さ偏差補正量候補値  $Zi\_inc\_cand$  を加えることで、新たな推定第 j ノード相対床高さ偏差  $Zi\_rel\_estm$  が求められる。第 j ノードについても同様である。

また、第 n ノードの2個の子ノードの床反力の合力  $Fn\_z$  が所定の値  $Fn\_min2$  より小さい場合（S 6 4 0 2 の判断結果が N O である場合）には、床形状偏差の推定精度が下がり過ぎるので、実質的な推定処理を実行せずに、S 6 4 0 6 において、2つの子ノードを持つノード用のグループ内全ホールド処理（第 n ノードが持つ2つの子ノードのそれぞれの推定ノード相対床高さ偏差を更新せずにホールドする処理）が行われる。そのホールド処理では、図 4 8 のフローチャート中の式で示す如く、第 i ノードおよび第 j ノードのそれぞれの推定ノード相対床高さ偏差  $Zi\_rel\_estm$ 、 $Zj\_rel\_estm$  の値が、前回制御周期での値  $Zi\_rel\_estm\_p$ 、 $Zj\_rel\_estm\_p$  に維持される。

次に、図 4 5 の S 6 4 0 0 で、2個の子ノードのモードが「すべてリセット」と判断すると、S 6 4 0 8 において、2つの子ノードを持つノード用グループ内全リセット処理（第 n ノードが持つ2つの子ノードのそれぞれの推定ノード相対床高さ偏差をリセットする処理）が行なわれる。そのリセット処理では、図 4 7 のフローチャート中の式に従って第

110

i ノードおよび第 j ノードのそれぞれの推定ノード相対床高さ偏差  $Zi\_rel\_estm$ 、 $Zj\_rel\_estm$  が 0 に徐々に近づいていくように更新される。なお、同式中の  $\Delta T$ 、 $T_{estm}$  の意味は、前記式 35 のものと同じである。

- 5      このリセット処理は、より一般的に言えば、 $Zi\_rel\_estm$ 、 $Zj\_rel\_estm$  を、それらの重み付き平均値が 0 という条件、すなわち  $Wi * Zi\_rel\_estm + Wj * Zj\_rel\_estm = 0$  を満足しつつ、それぞれ  $Zi\_rel\_estm\_p$ 、 $Zj\_rel\_estm\_p$  よりも 0 に近い値に決定するという処理である。なお、このリセット処理は、一次遅れ要素を含むため、ノード相対床高さ偏差が完全に 0 に戻るためには無限時間を要する。そこで、  
10      本出願人が先に提案した有限整定関数発生器（特開平 5-324115 号公報）を用いて、ノード相対床高さ偏差を徐々に 0 にリセットするようにしてもよい。

- 15      また、図 45 の S6400 で、2 個の子ノードのモードが「その他」である場合、すなわち、「すべて準備完了」、「すべてリセット」のいずれでもない場合（例えば 2 個の子ノードのモードがすべてホールドモードである場合）には、S6406 と同じ処理（図 48 を参照）が S6410 で実行される。

- 20      以上のように、第 n ノードの 2 個の子ノードのモードがすべて準備完了である場合で、且つ、ノード相対床高さ偏差の推定処理の発散が生じる恐れが無い場合にのみ、その 2 個の子ノードのノード相対床高さ偏差の実質的な推定処理が行なわれる。そして、子ノードのモードがすべて準備完了である場合であっても、推定処理の発散が生じる恐れがある場合には、2 個の子ノードの推定ノード相対床高さ偏差の値が、ホールド  
25      される。また、2 個の子ノードの実ノード床反力がいずれも 0 となる状況、すなわち、第 n ノードに属するすべての接地部位 10 に実床反力が

作用しない状況では、2個の子ノードのノード相対床高さ偏差は、徐々に0になるようにリセットされる。

次に、図41のS66の3子ノード床形状推定処理を図49～図55を参照して説明する。図49は3子ノード用床形状推定処理のサブルーチン処理を示すフローチャート、図50、図51はそれぞれ図49のS6604、S6608のサブルーチン処理を示すフローチャート、図52は図49のS6606、S6614およびS6618のサブルーチン処理を示すフローチャート、図53、図54はそれぞれ図49のS6612、S6616のサブルーチン処理を示すフローチャートである。

10 3子ノード用床形状推定処理では、図49のフローチャートに示されるように、S6600において、3個の子ノードをもつ第nノードのすべての子ノードのモード（図41のS58で決定されたモード）が判断される。その判断結果は、「すべて準備完了」、「すべてリセット」、「2つの子ノードのみ準備完了」、「1つの子ノードのみホールドで、残りがリセット」、「2つの子ノードのみホールドで、残りがリセット」、および「その他（else）」の6つに分けられる。

ここで、図49のフローチャートでは、3子ノード用床形状推定処理をより一般化して説明するために、前記第2参考例で説明した如く、各中間ノード（第145ノード、第236ノード）に属する接地部位10の  
20 すべてが同時に接地したり離床する場合だけでなく、各中間ノードの接地部位のうちのいずれかが接地し、その他の接地部位が離床するようにロボットの目標歩容を生成する場合についても考慮している。この場合、子ノードが2つの時と違い、3つの子ノードのモードが、「2つの子ノードのみ準備完了」、「1つの子ノードのみホールドで、残りがリセット」、  
25 ト」、もしくは「2つの子ノードのみホールドで、残りがリセット」の場合も考慮する必要がある。なお、以降の説明では、第nノードの3個

の子ノードを第  $i$  ノード、第  $j$  ノード、第  $k$  ノードとする。

ここで、子ノードのモードが「すべて準備完了」と判断すると、S 6 6 0 2 において、第  $n$  ノードの子ノードの実ノード床反力の並進力鉛直成分  $F_{i\_act\_z}$ ,  $F_{j\_act\_z}$ ,  $F_{k\_act\_z}$  の合力  $F_{n\_z}$  ( $= F_{i\_act\_z} +$   
5  $F_{j\_act\_z} + F_{k\_act\_z}$ ) 合力が所定の値  $F_{n\_min2}$  より大きいかな否かを判断する。 $F_{n\_z}$  は、換言すれば、第  $n$  ノードに属する全ての接地部位の実床反力の合力の並進力鉛直成分である。

S 6 6 0 2 の判断結果が Y E S である場合には、S 6 6 0 4 において、3 つの子ノードを持つノード用グループ内全推定処理（第  $n$  ノードが持つ 3 つの子ノードのそれぞれのノード相対床高さ偏差を実質的に推定する処理）を行なう。この処理では、図 5 0 のフローチャート中に示す式に従って第  $n$  ノードの 3 つの子ノードである第  $i$  ノード、第  $j$  ノードおよび第  $k$  ノードのそれぞれの推定ノード相対床高さ偏差  $Z_{i\_rel\_estm}$ ,  $Z_{j\_rel\_estm}$ ,  $Z_{k\_rel\_estm}$  が求められる（更新される）。すなわち、  
10  $Z_{i\_rel\_estm}$  について代表的に説明すると、 $Z_{i\_rel\_estm}$  の前回制御周期での値  $Z_{i\_rel\_estm\_p}$  に、前記 S 5 4 で求めた第  $i$  ノード相対床高さ偏差補正量候補値  $Z_{i\_inc\_cand}$  を加えることで、新たな推定第  $i$  ノード相対床高さ偏差  $Z_{i\_rel\_estm}$  が求められる。第  $j$  ノード、第  $k$  ノードについても同様である。

20 また、S 6 6 0 2 の判断結果が N O である場合には、床形状偏差の推定精度が下がり過ぎるので、実質的な推定処理を実行せずに、S 6 6 0 6 において、3 つの子ノードを持つノード用のグループ内全ホールド処理（第  $n$  ノードが持つ 3 つの子ノードのそれぞれの推定ノード相対床高さ偏差を更新せずにホールドする処理）が行われる。そのホールド処理  
25 では、図 5 2 のフローチャート中の式で示す如く、第  $i$  ノード、第  $j$  ノードおよび第  $k$  ノードのそれぞれの推定ノード相対床高さ偏差

$Zi\_rel\_estm$ 、 $Zj\_rel\_estm$ 、 $Zk\_rel\_estm$  の値が、前回制御周期での値  $Zi\_rel\_estm\_p$ 、 $Zj\_rel\_estm\_p$ 、 $Zk\_rel\_estm$  に維持される。

また図 4 9 の S 6 6 0 0 で、3 個の子ノードのモードが「すべてリセット」と判断すると、S 6 6 0 8 において、3 つの子ノードを持つノード用グループ内全リセット処理（第 n ノードが持つ 3 つの子ノードのそれぞれの推定ノード相対床高さ偏差をリセットする処理）が行われる。そのリセット処理では、図 5 1 のフローチャート中の式に従って第 i ノード、第 j ノードおよび第 k ノードのそれぞれの推定ノード相対床高さ偏差  $Zi\_rel\_estm$ 、 $Zj\_rel\_estm$ 、 $Zk\_rel\_estm$  が 0 に徐々に近づいていくように更新される。なお、同式中の  $\Delta T$ 、 $T_{estm}$  の意味は、前記式 3 5 のものと同じである。

このリセット処理はより一般的に言えば、 $Zi\_rel\_estm$ 、 $Zj\_rel\_estm$ 、 $Zk\_rel\_estm$  を、それらの重みつき平均値が 0 という条件、すなわち  $Wi * Zi\_rel\_estm + Wj * Zj\_rel\_estm + Wk * Zk\_rel\_estm = 0$  を満足しつつ、それぞれ  $Zi\_rel\_estm\_p$ 、 $Zj\_rel\_estm\_p$ 、 $Zk\_rel\_estm\_p$  よりも 0 に近い値に決定するという処理である。なお、 $Zi\_rel\_estm\_p$ 、 $Zj\_rel\_estm\_p$ 、 $Zk\_rel\_estm\_p$  を 0 にリセットするために、前記有限整定関数発生器（特開平 5 - 3 2 4 1 1 5 号公報）を用いてもよい。

また、図 4 9 の S 6 6 0 0 で、3 個の子ノードのモードが「2 つの子ノードのみ準備完了」と判断すると、第 n ノードの子ノードの実ノード床反力の合力（第 n ノードに属するすべての接地部位 1 0 の実床反力の合力）の並進力鉛直成分  $F_{n\_z}$  が所定の値  $F_{n\_min2}$  より大きいかな否かを S 6 6 1 0 で判断する。

この判断結果が Y E S である場合には、S 6 6 1 2 において、3 つの子ノードを持つノード用グループ内部分推定処理（第 n ノードが持つ 3 つの子ノードのそれぞれのノード相対床高さ偏差を実質的に推定する処

理)が行われる。この処理は、図53のフローチャートに示す如く実行される。なお、ここでは、第*i*ノードが準備完了モードでなく、第*j*ノードおよび第*k*ノードが準備完了モードであるとする。

まず、S66120において第*i*ノードのモードが判断される。この  
5 判断結果がホールドモードである場合には、S66122において、新たな第*i*ノード相対床高さ偏差補正量候補値  $Zi\_inc\_cand'$  を0に決定し、リセットモードである場合には、S66124において、図中の式により、新たな第*i*ノード相対床高さ偏差補正量候補値  $Zi\_inc\_cand'$  を決定する。S66124で決定される  $Zi\_inc\_cand'$  は、 $Zi\_rel\_estm\_p$  を  
10 徐々に0に近づけるための第*i*ノード相対床高さ偏差補正量候補値である。なお、S66124の式中の $\Delta T$ 、 $Testm$ の意味は、前記式35のものと同一である。補足すると、S66124で  $Zi\_inc\_cand'$  を決定するとき、前記有限整定関数発生器(特開平5-324115号公報)を用いてもよい。

15 次いで、S66126において、図中の式に従って、新たな第*j*ノード相対床高さ偏差補正量候補値  $Zj\_inc\_cand'$  および新たな第*k*ノード相対床高さ偏差補正量候補値  $Zk\_inc\_cand'$  を決定する。

すなわち、 $Wi * Zi\_inc\_cand' + Wj * Zj\_inc\_cand' + Wk * Zk\_inc\_cand' = 0$  という条件 ( $Zi\_inc\_cand'$ ,  $Zj\_inc\_cand'$ ,  
20  $Zk\_inc\_cand'$  の重み付き平均値が0という条件) と、 $Zj\_inc\_cand' - Zj\_inc\_cand = Zk\_inc\_cand' - Zk\_inc\_cand$  という条件を満足するように  $Zj\_inc\_cand'$ ,  $Zk\_inc\_cand'$  を決定する。

次いで、S66128において、上記の如く決定された  $Zi\_inc\_cand'$ ,  $Zj\_inc\_cand'$ ,  $Zk\_inc\_cand'$  をそれぞれ第*i*ノード、第*j*ノード、第*k*  
25 ノードの相対床高さ偏差の前回制御周期での値  $Zi\_rel\_estm\_p$ ,  $Zj\_rel\_estm\_p$ ,  $Zk\_rel\_estm\_p$  に加えることで、新たな  $Zi\_rel\_estm$ ,

Zj\_rel\_estm, Zk\_rel\_estm が決定される。

このように Zi\_rel\_estm, Zj\_rel\_estm, Zk\_rel\_estm を決定すること  
とで、 $W_i * Z_i\_rel\_estm + W_j * Z_j\_rel\_estm + W_k * Z_k\_rel\_estm = 0$  を  
満足しつつ、Zj\_rel\_estm - Zk\_rel\_estm が Zj\_inc\_cand - Zk\_inc\_cand  
5 に近づくように Zi\_rel\_estm, Zj\_rel\_estm, Zk\_rel\_estm が決定され  
ることとなる。

また、図49のS6610の判断結果がNOである場合には、床形状  
偏差の推定精度が下がり過ぎるので、実質的な推定処理を実行せずに、  
S6614において、前記S6606と同じ処理（図52を参照）が実  
10 行される。

また図49のS6600で、3個の子ノードのモードが「1つの子ノ  
ードのみホールドで、残りがリセット」と判断すると、S6616にお  
いて、1つの子モードのみホールドで、残りがリセットの場合に対応す  
る処理が実行される。その処理で、図54のフローチャート中に示す式  
15 によって、新たなノード相対床高さ偏差 Zi\_rel\_estm, Zj\_rel\_estm,  
Zk\_rel\_estm が決定される。なお、ここでは、第iノードのモードがホ  
ールドモードで、第jノードおよび第kノードのモードがリセットモー  
ドであるとする。また、同式中のは、 $\Delta T$ 、Testm の意味は、前記式3  
5 のものと同じである。

20 図54の処理は、より一般的には、Zi\_rel\_estm を0に決定し、  
Zj\_rel\_estm, Zk\_rel\_estm を、 $W_i * Z_i\_rel\_estm + W_j * Z_j\_rel\_estm +$   
 $+ W_k * Z_k\_rel\_estm = 0$  (Zi\_rel\_estm, Zj\_rel\_estm, Zk\_rel\_estm の  
重み付け平均値が0であるという条件) を満足しつつ、Zj\_rel\_estm\_p,  
Zk\_rel\_estm\_p よりも0に近い値に決定する処理である。補足すると、  
25 第jノードおよび第kノードのモードが共にリセットモードになる時点  
までに、それらのノードの重み Wj, Wk は0となっているはずである。

従って、重み  $W_i$ ,  $W_j$ ,  $W_k$  の和が 1 であるという条件から、この時点までに  $W_i$  が 1 となっており、また、 $W_i * Z_{i\_rel\_estm} + W_j * Z_{j\_rel\_estm} + W_k * Z_{k\_rel\_estm} = 0$  であるから、この時点までに、 $Z_{i\_rel\_estm}$  は 0 になっている。このため、第  $i$  ノードの  $Z_{i\_rel\_estm}$  の値をホールドするということは、その値を 0 に維持するということである。そこで、図 5 4 の処理では、 $Z_{i\_rel\_estm}$  の値を 0 に決定するようにしている。

なお、 $Z_{j\_rel\_estm}$ ,  $Z_{k\_rel\_estm}$  を徐々に 0 にリセットする処理では、前記有限整定関数発生器（特開平 5 - 3 2 4 1 1 5 号公報）を用いてもよい。

更に図 4 9 の S 6 6 0 0 で、子ノードのモードが「2 つの子ノードのみホールドで、残りがリセット」と判断すると、S 6 6 1 8 において、2 つの子モードのみホールドで、残りがリセットの場合の処理が行われる。その処理では、図 5 5 のフローチャート中の式に従って、新たなノード相対床高さ偏差  $Z_{i\_rel\_estm}$ ,  $Z_{j\_rel\_estm}$ ,  $Z_{k\_rel\_estm}$  が決定される。なお、ここでは、第  $i$  ノードおよび第  $j$  モードのモードが共にホールドモードで、第  $k$  ノードのモードがリセットモードであるとする。また、同式中の  $\Delta T$ 、 $T_{estm}$  の意味は、前記式 3 5 のものと同じである。

図 5 5 の処理は、より一般的には、 $Z_{i\_rel\_estm}$ ,  $Z_{j\_rel\_estm}$  をそれぞれ前回制御周期での値にホールドし、 $Z_{k\_rel\_estm}$  を、 $W_i * Z_{i\_rel\_estm} + W_j * Z_{j\_rel\_estm} + W_k * Z_{k\_rel\_estm} = 0$  ( $Z_{i\_rel\_estm}$ ,  $Z_{j\_rel\_estm}$ ,  $Z_{k\_rel\_estm}$  の重み付け平均値が 0 であるという条件) を満足しつつ、 $Z_{k\_rel\_estm\_p}$  よりも 0 に近い値に決定する処理である。補足すると、第  $k$  モードがリセットモードになる時点までに、 $W_k$  は 0 となっている。

なお、 $Z_{k\_rel\_estm}$  を徐々に 0 にリセットする処理では、前記有限整



定関数発生器（特開平5-324115号公報）を用いてもよい。

更に図49のS6620で「その他」と判断した場合（例えば3個の子ノードのモードがすべてホールドモードである場合）には、S6620において、前記S6606と同じ処理（図52を参照）が実行される。

- 5     以上のように、第 $n$ ノードの3個の子ノードのモードのうち、2つ以上の子ノードのモードが準備完了である場合で、且つ、ノード相対床高さ偏差の推定処理の発散が生じる恐れが無い場合にのみ、その2個以上の子ノードのノード相対床高さ偏差の実質的な推定処理が行なわれる。そして、2つ以上の子ノードのモードが準備完了である場合であっても、
- 10   推定処理の発散が生じる恐れがある場合には、3個の子ノードの推定ノード相対床高さ偏差の値が、ホールドされる。

以上のごとく、図41のS60～S66では、推定第 $n$ ノード相対床高さ偏差  $Zn\_rel\_estm(n=1,2,\dots, \text{最終ノード番号})$  が決定される。なお、根ノードの相対床高さ偏差は0である。

- 15   図41のフローチャートの処理では、最後に、S72において、第 $n$ ノード( $n=1,2,\dots, \text{最終葉ノード番号}$ )のすべての先祖ノードの推定相対床高さ偏差と推定第 $n$ ノード相対床高さ偏差との和を求め、求めた和を推定第 $n$ 接地部位床高さ偏差（推定第 $n$ 床高さ偏差） $Zfn\_estm$  とする。

- 20   以上が、図40における床高さ偏差の推定処理のサブルーチン処理である。

- 次に図35の説明に戻って、上述のように床形状推定器130で逐次求められた推定第 $n$ 床高さ偏差  $Zfn\_estm(n=1,2,\dots, \text{最終葉ノード番号})$  は、加算器132により、各接地部位10の修正目標接地部位位置姿勢に加算され、これにより、床形状偏差補償入り修正目標接地部位位置姿勢が求められる。そして、この床形状偏差補償入り修正目標接地部位位置姿勢が修正目標接地部位位置姿勢の代わりに、前記機構変形補償入り
- 25

修正目標接地部位位置姿勢算出部 114h へ入力される。

以上の説明した床形状推定器 130 および加算器 132 を含む制御装置 50 の処理を該制御装置 50 の制御周期毎に繰り返し実行することにより、推定第  $n$  床高さ偏差  $Z_{fn\_estm}$  が実際の第  $n$  床高さ偏差に収束する。また、各目標接地部位位置姿勢は、その接地部位に対応する推定第  $n$  床高さ偏差  $Z_{fn\_estm}$  に応じて修正され、実際の第  $n$  床高さ偏差が実床反力に及ぼす影響を吸収する。

尚、すべての第  $n$  接地部位 ( $n=1,2,\dots$ , 最終葉ノード番号) が接地しているならば、第  $n$  接地部位の実際の接地面上における目標第  $n$  接地部位床反力中心点  $Q_n$  に相当する点は、実第  $n$  床接点  $D_{n\_act}$  に一致するはずである。従って、前記瞬間第  $n$  ノード相対床高さ偏差  $Z_{n\_rel}$  は、変動しないはずである。しかし、実際にはロボット 1 の機械系や制御系の振動および電氣的なノイズにより、前記床形状推定器 130 の前記した計算アルゴリズムによって得られた瞬間第  $n$  ノード相対床高さ偏差  $Z_{n\_rel}$  は、激しく変動する。従って、瞬間第  $n$  ノード相対床高さ偏差をそのまま推定第  $n$  ノード相対床高さ偏差として用いて、これを基に推定第  $n$  床高さ偏差  $Z_{fn\_estm}$  を求め (すなわち第  $n$  ノード ( $n=1,2,\dots$ , 最終葉ノード番号) のすべての先祖ノードの瞬間相対床高さ偏差と瞬間第  $n$  ノード相対床高さ偏差との和をもって推定第  $n$  床高さ偏差  $Z_{fn\_estm}$  とし)、さらに図 35 に示すように、推定第  $n$  床高さ偏差  $Z_{fn\_estm}$  を修正目標接地部位位置姿勢に加算したものを機構変形補償入り修正目標接地部位位置姿勢算出部 114h へ入力させると、ロボット 1 の接地部位 10 は発振するかあるいは激しく振動する。

ところで、前記 2 つの子ノードを持つノード用グループ内全推定処理、3 つの子ノードを持つノード用グループ内全推定処理、3 つの子ノードを持つノード用グループ内部分推定処理では、瞬間第  $n$  ノード相対床

高さ偏差  $Z_{n\_rel}$  から推定第  $n$  ノード相対床高さ偏差  $Z_{n\_rel\_estm}$  までの伝達関数は、1 次遅れのローパスフィルタになる。即ち、推定第  $n$  ノード相対床高さ偏差  $Z_{n\_rel\_estm}$  は瞬間第  $n$  ノード相対床高さ偏差  $Z_{n\_rel}$  にローパスフィルタを通したものとなる。従って、推定第  $n$  ノード相対床高さ偏差  $Z_{n\_rel\_estm}$  を基に求めた推定第  $n$  床高さ偏差  $Z_{fn\_estm}$  を図 35 に示すように修正目標接地部位位置姿勢に加算しても、各接地部位 10 の発振や振動を生じ難くなる。これにより、各接地部位 10 の発振や振動を防止することができる。

ちなみに、本参考例では、上記ローパスフィルタの時定数は  $T_{estm}$  である。なお、本参考例で説明した床形状推定器 130 の処理以外にも、瞬間第  $n$  ノード相対床高さ偏差  $Z_{n\_rel}$  から推定第  $n$  ノード相対床高さ偏差  $Z_{n\_rel\_estm}$  までの伝達関数がローパスフィルタになるように構成することは可能である。

次いで、この実施の形態における床形状推定器 130 の特徴を説明する。

ロボット 1 の姿勢安定化制御のために必要な各ノード補償モーメントを発生させようと、各ノード補償角を変化させ、最終的な目標接地部位位置姿勢である機構変形補償入り修正目標接地部位位置姿勢を変更させても、各接地部位 10 が実際に接地している限り、第  $n$  接地部位 10 の実際の接地面上における目標第  $n$  接地部位床反力中心点  $Q_n$  に相当する点は、実第  $n$  床接点  $D_{nact}$  に一致したまま動かない。その代わりに、各脚のコンプライアンス機構 42 などが変形したり、上体 24 の位置姿勢が変化する。即ち、機構変形補償入り修正目標接地部位位置姿勢を変更させた分を打ち消すように、コンプライアンス機構 42 などが変形したり、上体 24 の位置姿勢が変化する。

## 120

本参考例における床形状推定器 130 は、機構変形補償入り修正目標接地部位位置姿勢から推定第  $n$  床高さ偏差  $Z_{fn\_estm}(n=1,2,\dots, \text{最終葉ノード番号})$  を算出するまでに、実床反力を基に機構コンプライアンスモデル 134 によって算出されたコンプライアンス機構 42 などの変形  
5 量と上体姿勢傾斜偏差  $\theta_{berr}$  とによる推定第  $n$  床高さ偏差  $Z_{fn\_estm}$  への影響を打ち消しているので、上体姿勢傾斜偏差が生じたり、機構変形補償入り修正目標接地部位位置姿勢が変動しても、推定第  $n$  床高さ偏差  $Z_{fn\_estm}$  はその影響を受けない。

これは、床形状の推定処理が、ロボット 1 のコンプライアンス制御や  
10 姿勢制御から干渉を受けないことを意味する。従って、推定第  $n$  床高さ偏差  $Z_{fn\_estm}$  を図 35 に示すように修正目標接地部位位置姿勢に加算しても、ロボット 1 の制御系の安定余裕（発振のし難さ）はほとんど低下しない。すなわち、コンプライアンス制御、姿勢制御、および床形状の推定処理と、床形状偏差の推定値を用いたロボット 1 の目標歩容の  
15 補正動作とを同時に行なっても、各制御・処理が干渉し合って発振することはほとんどない。すなわち、簡単に言えば、床形状偏差の複数のパラメータを同時に推定しながら、床形状偏差が床反力に及ぼす影響を打ち消すための脚の補償動作（接地部位の位置姿勢の修正動作）も同時に  
20 実行することができる。さらには、姿勢制御のための脚の補償動作（接地部位の位置姿勢の修正動作）も同時に実行することができる。

また、各接地部位 10 の推定第  $n$  床高さ偏差  $Z_{fn\_estm}$  を図 35 に示すように修正目標接地部位位置姿勢に加算すると、実際に第  $n$  床高さ偏差が存在していても、その影響を打ち消すことができるので、実全床反力は、定常的にはロボット 1 が想定床を移動している場合と同一になる。  
25 しかも、推定第  $n$  床高さ偏差  $Z_{fn\_estm}$  の推定と、推定第  $n$  床高さ偏差  $Z_{fn\_estm}$  を用いた修正目標接地部位位置姿勢の修正とは制御周期

## 1 2 1

毎に逐次実行されるので、床形状が途中で変化しても、変化後の第  $n$  床高さ偏差を推定し、その推定値に基づいて床形状の変化の影響を打ち消すことができる。ただし、床形状推定器 1 3 0 には前述したようにローパスフィルタが含まれるので、各接地部位 1 0 が接地した直後や床形状が途中で変化したときには、過渡的には、実全床反力は、床形状偏差の影響を受ける。しかし、その後、時定数  $T_{estm}$  でその影響が減衰する。

また、以下の特徴もある。

1) 床形状偏差が大きくても制御が破綻し難い。これは、階層型コンプライアンス制御は微小な補償角に限定した近似を行っていないからである。

2) 床形状偏差の推定精度が高い。

3) ロボットの姿勢安定化制御との干渉による発振が生じにくいので、推定処理の時定数を短くすることができる。それによって、床形状偏差が床反力に及ぼす影響を打ち消すための脚の補償動作の応答性を高めることができるので、床形状偏差が床反力に及ぼす過渡的な影響が短時間で解消される。

ロボットの移動時の 1 歩前の着地期（ある接地部位 1 0 が接地状態となる時期）での推定第  $n$  床高さ偏差と、当該 1 歩前の着地期の次の着地期での推定第  $n$  床高さ偏差との関係に相関がない場合には、本参考例に示したように推定第  $n$  床高さ偏差を強制的に徐々に 0 に収束させるのが良い。しかし、例えば、想定床に考慮されていない実床面のうねりがゆったりとしていることが分かっているならば、前記関係にある程度の相関があると考えられる。この場合には、現在の着地期における推定第  $n$  床高さ偏差を、強制的に徐々に 1 歩前の着地期における推定第  $n$  床高さ偏差に 1 より小さい正の定数を乗じた値に収束させるようにして

も良い。

さらに、1歩前の着地期での推定第  $n$  床高さ偏差だけでなく、複数歩前の着地期での推定第  $n$  床高さ偏差も用いて現在の着地期における推定第  $n$  床高さ偏差の収束目標値を決定しても良い。また、現在や1歩  
5 前や複数歩前の着地期における他のノードの推定第  $n$  ノード床高さ偏差および推定第  $n$  ノード床傾斜偏差も用いて収束目標値を決定しても良い。

本参考例（第3参考例）は上記の如く構成したので、従来技術では困難であった多くの接地部位を持つロボットにおいても、床形状の推定、  
10 具体的には、各接地部位に対応する床高さ偏差を同時に、換言すれば複合的に、精度良く推定することができる。さらに、ロボットの接地部位をその姿勢を制御可能に設け、床形状の推定処理において床高さ偏差だけでなく、床傾斜偏差も推定する場合には、床傾斜偏差も含めて同時に、  
15 精度良く推定することができる。

さらには、床形状の推定結果を基に目標接地部位位置姿勢軌道を修正することにより、床形状が想定していた形状と異なっても、その影響を吸収して望み通りの床反力を発生させることができる。

特に、床形状偏差の推定値による補正がない階層型コンプライアンス  
20 制御で除去しきれなかった実床反力の制御目標値からの定常偏差を可能な限り零に近づけることができる。換言すれば床形状の偏差に起因する床反力の定常偏差を解消することができる。

また、床形状の推定精度が低下する恐れがある状況あるいはその推定値が発散する恐れがある状況では床形状の推定を中断するように構成したので、前記した作用効果に加え、推定値が不適切なものとなることが  
25 ない。

## 1 2.3

尚、本参考例に係るロボットの床形状推定装置 1 3 0 は前記した手法で床形状を推定すれば足り、推定値に基づいて運動を補正することは必須ではない。

## 5 [第 4 の参考例]

次に、本発明の第 4 参考例に係る移動ロボットの制御装置（特い床形状推定装置）を説明する。第 4 参考例においては、それを簡単に説明すれば、前記第 3 参考例の図 4 0 に示した床形状推定器 1 3 0 のブロック線図を等価変換したものである。すなわち、直前に推定した床形状の推定値（前回制御周期での推定値などの該推定値の過去値）と、最終的に修正され決定された目標歩容（詳しくはコンプライアンス動作を含む機構変形補償入り修正目標接地部位位置姿勢）（もしくは実関節変位）と、実上体姿勢傾斜偏差  $\theta_{berr}$  とを基に、各ノードの床反力を推定し、その推定値と各ノードの実床反力との差を基に、この差を 0 に近づけるように床形状の推定値の補正量候補値を決定し、床形状の推定が発散しないと判断されるならば、床形状の推定値の補正量候補値を基に、直前に推定した床形状の推定値を補正するようにした。この処理は、本出願人が先に提案した特開平 1 0 - 2 7 7 9 6 9 号公報において、2 足移動ロボットの各脚の足平の床反力中心点まわりの想定されるモーメントと実モーメントとの差が 0 に近づくように各足平に係る床傾斜を推定する手段、ならびに、全床反力中心点まわりの想定されるモーメントと実モーメントとの差が 0 に近づくように両脚間の干渉角を推定する手段を発展させた階層型の床形状推定手段に相当するものである。

このように本参考例は、床形状推定器 1 3 0 の処理のみが、第 3 参考例と相違するものであり、床形状推定器 1 3 0 以外の処理については説明を省略する。

## 1 2 4

図 5 7 は、本参考例における床形状推定器 1 3 0 の機能的手段を示すブロック図である。この図 5 7 を参照して本参考例における床形状推定器 1 3 0 を以下に説明する。

5 先ず、各接地部位 1 0 の機構変形補償入り修正目標第  $n$  接地部位位置姿勢( $n=1,2,\dots$ ,最終葉ノード番号)と、各接地部位 1 0 の目標接地部位位置から見た該接地部位 1 0 の目標第  $n$  接地部位床反力中心点と、前記姿勢傾斜偏差  $\theta_{berr}$  とを基に、機構変形補償入り修正目標第  $n$  接地部位位置姿勢を、目標全床反力中心点を回転中心として  $\theta_{berr}$  だけ回転移動させてなる、回転後機構変形補償入り修正目標第  $n$  接地部位位置姿勢  
10 ( $n=1,2,\dots$ ,最終葉ノード番号)を求める。求められた回転後機構変形補償入り修正目標第  $n$  接地部位位置姿勢( $n=1,2,\dots$ ,最終葉ノード番号)から、目標歩容上での想定第  $n$  床接地位置  $D_n$ ( $n=1,2,\dots$ ,最終葉ノード番号)を減算し、第  $n$  接地部位干渉高さ  $Z_{n\_int}$  を求める。それを床形状推定器 1 3 0 に備えた機構コンプライアンスモデル（逆モデル）へ入力することによって、各接地部位 1 0 の床反力の推定値である推定第  $n$  接地部位  
15 床反力を求める。

なお、ここでの機構コンプライアンスモデルは、各接地部位干渉高さの互いの相対関係に応じて推定接地部位床反力の互いの相対関係を求めるものであり、絶対値に意味をもたない。また、第  $n$  接地部位の実床反力  
20  $F_{n\_act}$  の検出値がある閾値  $F_{n\_min3}$  より小さい場合には、上記機構コンプライアンスモデルにおいても第  $n$  接地部位が接地していないものと想定する。

さらに、第  $n$  接地部位( $n=1,2,\dots$ ,最終葉ノード番号)の実床反力  $F_{nact}$  の検出値から、前記推定第  $n$  接地部位床反力を減算し、第  $n$  接地部位床  
25 反力推定誤差  $F_{fn\_estm\_err}$  を求める。この第  $n$  接地部位床反力推定誤差  $F_{fn\_estm\_err}$  は、力で表現されているため、換算値  $C_n$ （例えば、



バネ定数の逆数のようなもの)によって高さ偏差に換算し、それを第  $n$  接地部位床高さ偏差補正量候補値  $Z_{fn\_inc\_cand}$  として得る。なお、換算値  $C_n$  は、対角行列とは限らない。

- 次いで、求められた第  $n$  接地部位床高さ偏差補正量候補値
- 5  $Z_{fn\_inc\_cand}$  から、前記した「階層相対化処理」によって、階層相対化することで、第  $n$  ノード相対床高さ偏差補正量候補値  $Z_n\_inc\_cand$  ( $n=1,2,\dots$ , 最終ノード番号)を求める。次に、床高さ偏差の推定処理のサブルーチン処理によって、第  $n$  ノード相対床高さ偏差補正量候補値  $Z_n\_inc\_cand$  から、推定床高さ偏差 (推定第  $n$  床高さ偏差)
- 10  $Z_{fn\_estm}$  ( $n=1,2,\dots$ , 最終葉ノード番号)を求める。ここでの床高さ偏差の推定処理のサブルーチン処理は、図 41 の S56 ~ S72 までの処理と同一である。

- なお、特開平 10-277969 号公報に示したように、接地部位として姿勢を制御可能な足平を持ち、接地部位における床傾斜偏差を推定
- 15 することができるロボットの場合には、図 41 の S70 に関して説明した如く、接地部位床傾斜偏差推定処理を行なうのが望ましい。

- ここで、第 3 参考例と第 4 参考例 (本参考例) とを比較する。第 4 参考例は、簡単に言えば、第 3 参考例の床形状推定器 130 のブロック線図を等価変換したものになっている。したがって、第 4 参考例の作用効果は、第 3 参考例の作用効果と同じである。また、第 3 参考例と同様、
- 20 床形状の推定値に基づいて運動を補正することは必須ではない。

- 尚、第 3 および第 4 参考例において、床反力センサとして、分布圧センサを用いても良い。6 軸力センサ 34 などの力センサよりも分布圧センサの方が実床反力による接地部位の変形をより細緻に推定することができるので、床形状推定の精度を向上させることができる。
- 25

さらには、本出願人による特許第 3035051 号公報の図 1 に示す

如く、接地部位に接触センサを複数個配置（例えば接地部位の四隅に配置）し、その出力信号に基づいて接地部位がどちらの方向に浮きやすいかを判定しても良い。そして、接地していない接触センサが増々浮く方向での床形状の推定を中断したり、あるいは、全ての接触センサが浮いているときにも床形状の推定を中断するようにしてもよい。

[第 5 参考例]

前記第 1 ～ 第 4 参考例では、子ノードを持つノードの、該子ノードの総数が、3 個以下の場合を例にとって説明したが、子ノードの数が 4 つ以上の場合にも、重み付き平均の概念を持ち込むことによって、以下に示すようにモーメントおよび傾斜角の概念を拡張できる。

目標値、実際値、偏差のいずれに関しても概念を拡張できるので、ここでは、目標値、実際値、偏差の区別をせず、一般的な接地部位床反力の組  $F_n(n=1,2,\dots)$  に対するモーメントを、以下のように拡張して、定義する。

第  $n$  接地部位の床反力の組  $F_n(n=1,2,\dots,\text{最終葉ノード番号})$  を階層相対化して、第  $n$  ノード相対床反力  $F_{n\_rel}(n=1,2,\dots,\text{最終ノード番号})$  を求める。

第  $n$  ノードの子ノードの数を  $r$  とする。

第  $n$  ノードの第  $j$  番目の子ノードの識別番号が  $a_j (j=1,2,\dots,r)$  であるとする。

第  $n$  ノードの第  $j$  番目の子ノードの重みが、 $W_j (j=1,2,\dots,r)$  であるとする。

第  $n$  ノードの第  $j$  番目の子ノードの重みを第  $j$  要素として持つ列ベクトルを  $UW_n$  とする。

1 2 7

すなわち、下式 3 8 のように  $UW_n$  を定義する。ここで「T」は、転置を意味し、行ベクトルの転置によって列ベクトルを表現することとする。

$$UW_n = (Wa1, Wa2, \dots, War)^T \quad \dots \text{式 3 8}$$

5

ベクトル  $UW_n$  に直交する（すなわちベクトル  $UW_n$  との内積が 0 となる） $r-1$  個の互いに独立なベクトルを  $R(1), R(2), \dots, R(r-1)$  とする。 $R(j)$  ( $j=1, 2, \dots, r-1$ ) は、 $r$  行 1 列の列ベクトルである。なお、 $R(j)$  ( $j=1, 2, \dots, r-1$ ) は、演算の容易さと制御精度を考慮すると、互いに直交することが望ましい。 $R(j)$  を第  $j$  列 ( $j=1, 2, \dots, r-1$ ) とする行列を  $H_n$  とする。 $H_n$  は、 $r$  行  $r-1$  列の行列である。

10

第  $n$  ノードの第  $j$  番目の子ノードの相対床反力  $F_{aj\_rel}$  を第  $j$  要素 ( $j=1, 2, \dots, r$ ) とする列ベクトルを第  $n$  グループ相対床反力ベクトル  $F_{n\_rel\_c}$  とする。

15 すなわち、次式 3 9 により、 $F_{n\_rel\_c}$  を定義する。

$$F_{n\_rel\_c} = (Fa1\_rel, Fa2\_rel, \dots, Far\_rel)^T \quad \dots \text{式 3 9}$$

$F_{n\_rel\_c}$  は、 $r$  行 1 列の列ベクトルである。

次式 4 0 を満足する列ベクトル  $M_{n\_exp}$  を第  $n$  ノード拡張床反力モーメントと呼ぶ。

20

$$F_{n\_rel\_c} = H_n * M_{n\_exp} \quad \dots \text{式 4 0}$$

$M_{n\_exp}$  は、 $r-1$  行 1 列の列ベクトルである。

25 以上のように、接地部位床反力の組  $F_n(n=1, 2, \dots)$  に対し、第  $n$  ノー

ド拡張床反力モーメント  $Mn\_exp$  を定義する。

すなわち、接地部位床反力  $F_n(n=1,2,\dots)$  を基に、階層化したノード  
 相対床反力  $F_{n\_rel}(n=1,2,\dots)$  を求め、さらに第  $n$  ノードのすべての子ノ  
 ード  $a_j$  ( $j=a1,a2,\dots,ar$ ) の相対床反力を要素とするベクトル ( $F_{a1\_rel},$   
 5  $F_{a2\_rel},\dots,F_{ar\_rel}$ )<sup>T</sup> を、第  $n$  ノードのすべての子ノードの重みを要素  
 とするベクトル ( $W_{a1},W_{a2},\dots,W_{ar}$ )<sup>T</sup> に直交するある所定の互いに独立  
 なベクトル  $R(j)$  ( $j=1,2,\dots,r-1$ ) の線形結合で表したときの線形結合の係  
 数を要素とするベクトルを、第  $n$  ノード拡張床反力モーメント  $Mn\_exp$   
 と呼ぶ。

10 なお、第  $n$  ノード拡張床反力モーメント  $Mn\_exp$  の第  $j$  番目要素  
 (第  $j$  行目要素) を第  $n$  ノード拡張床反力モーメント第  $j$  成分と呼ぶ。

また、実接地部位床反力の組  $F_n(n=1,2,\dots)$  に対する第  $n$  ノード拡張  
 床反力モーメントを実第  $n$  ノード拡張床反力モーメント  $Mn\_exp\_act$  と  
 呼ぶ。

15 また、目標接地部位床反力の組  $F_n(n=1,2,\dots)$  に対する第  $n$  ノード拡  
 張床反力モーメントを目標第  $n$  ノード拡張床反力モーメント  
 $Mn\_exp\_ref$  と呼ぶ。目標第  $n$  ノード拡張床反力モーメントは、通常 0  
 ベクトルに設定される。

20 また、接地部位床反力偏差の組  $F_n(n=1,2,\dots)$  に対する第  $n$  ノード拡  
 張床反力モーメントを第  $n$  ノード拡張床反力モーメント偏差  
 $Mn\_exp\_err$  と呼ぶ。

同様に、一般的な接地部位高さの組  $Z_n(n=1,2,\dots)$  に対する傾斜角を、  
 以下のように拡張して、定義する。

接地部位高さの組  $Z_n(n=1,2,\dots,最終葉ノード番号)$  を階層相対化して、  
 25 第  $n$  ノード相対高さ  $Z_{n\_rel}(n=1,2,\dots,最終ノード番号)$  を求める。

第  $n$  ノードの第  $j$  番目の子ノードの相対高さ  $Z_{aj\_rel}$  を第  $j$  要素

( $j=1,2,\dots,r$ )とする列ベクトルを第  $n$  ノード相対高さベクトル  $Zn\_rel\_c$  とする。

すなわち、次式 4 1 により  $Zn\_rel\_c$  を定義する。

$$Zn\_rel\_c = (Za1\_rel, Za2\_rel, \dots, Zar\_rel)^T \quad \dots \text{式 4 1}$$

5

次式 4 2 を満足する列ベクトル  $\theta n\_exp$  を第  $n$  ノード拡張床反力傾斜角と呼ぶ。

$$Zn\_rel\_c = Hn * \theta n\_exp \quad \dots \text{式 4 2}$$

10

$\theta n\_exp$  は、 $r-1$  行 1 列の列ベクトルである。

すなわち、接地部位高さ  $Zn(n=1,2,\dots)$  を基に、階層化したノード相対高さ  $Zn\_rel(n=1,2,\dots)$  を求め、さらに第  $n$  ノードのすべての子ノード  $a_j$  ( $j=1,2,\dots,r$ ) の相対高さを要素とするベクトル  $(Za1\_rel, Za2\_rel, \dots, Zar\_rel)^T$  を、第  $n$  ノードのすべての子ノードの重みを要素とするベクトル  $(Wa1, Wa2, \dots, War)^T$  に直交する前記所定の互いに独立なベクトル  $R(j)$  ( $j=1,2,\dots,r-1$ ) の線形結合で表したときの線形結合の係数を要素とするベクトルを、第  $n$  ノード拡張傾斜角  $\theta n$  と呼ぶ。

15

上記のように定義された拡張床反力モーメントと拡張傾斜角とを用いることにより、第  $a$  ノードの子ノードの数が 4 つ以上の場合にも、コンプライアンス制御および床形状推定の処理は、ほとんどそのまま拡張される。以下にその例を第 5 の参考例として説明する。なお、第 5 参考例は、ロボットの制御装置の機能的構成は、前記図 2 に示したものと同様とする。また、この場合、階層型コンプライアンス動作決定部は、補償全床反力モーメント分配器、補償角決定部、および床形状推定器以外

20

25

[補償全床反力モーメント分配器の処理の拡張について]

例えば、階層型コンプライアンス動作決定部の中の補償全床反力モーメント分配器の処理は、次のように拡張される。

- 5     ロボットの姿勢を復元させるために目標第  $n$  ノード拡張床反力モーメント  $Mn\_exp\_rel$  (通常 0) に付加的に発生すべき拡張床反力モーメントを第  $n$  ノード補償拡張床反力モーメント  $Mn\_exp\_dmd$  と呼ぶ。

- 第  $n$  ノード補償拡張床反力モーメント  $Mn\_exp\_dmd$  と第  $n$  ノード補償床反力モーメント  $Mn\_dmd$  の間には、次式 4 3 の関係がある。ただし、 $Cn\_mech$  は、各目標ノード床反力中心点とロボットの機構のコン
- 10   プライアンス特性とによって決定される所定の係数行列 (2 行  $r-1$  列の行列) である。

$$Mn\_dmd = Cn\_mech * Mn\_exp\_dmd \quad \dots \text{式 4 3}$$

15

一方、前記式 1 0 を一般化すると次式 4 4 になる。

$$Mdmd = \Sigma Mn\_dmd \quad \dots \text{式 4 4}$$

- 20     なお、 $\Sigma$  は、全ての第  $n$  ノードについての総和を意味する。

よって、補償全床反力モーメント分配器では、式 4 3 と式 4 4 を満足するように、第  $n$  ノード補償拡張床反力モーメント  $Mn\_exp\_dmd$  ( $n=1,2,\dots$ ) および第  $n$  ノード補償床反力モーメント  $Mn\_dmd$  を決定すれば良い。

25

[補償角決定部 ( $\theta n$  決定部) の処理の拡張について]

第5参考例における各第 $n$ ノードの補償角決定部の処理は、例えば第3参考例の $\theta_{145}$ 決定部（図25および図33を参照）の処理において、 $M_{145act}$ を求めるまでの処理を、各接地部位の実床反力を基に前記の実第 $n$ ノード拡張床反力モーメント  $M_{n\_exp\_act}$  を求める処理に置き換え、145を $n$ に置き換え、図33中の補償フィルタ、ローパスフィルタおよびゲイン  $K_n$  の次元を第 $n$ ノードの子ノード数から1を減じた数に拡張すれば良い。上記の置き換えを行なった処理によって、第 $n$ ノードの補償角  $\theta_n$  を求めることができる。

#### 10 [拡張床反力モーメントを用いた床形状推定について]

以下のように、床形状推定器の処理の一部に拡張床反力モーメントの概念を用いた手法を組み込んでも良い。

すなわち、前記第4参考例で説明した床形状推定器の図56に示した処理の代わりに、図57のブロック図で示す処理を用いて、床形状偏差を推定する。

図57を参照して、この処理を説明すると、まず、前記図56で説明した如く算出される推定第 $n$ 接地部位床反力と、第 $n$ 接地部位の実床反との差（各ノード毎の差の組）から、拡張モーメントの定義にしたがって、第 $n$ 接地部位床反力推定誤差  $F_{fn\_estm\_err}$  ( $n=1,2,\dots$ )に対応する第 $n$ ノード拡張床反力モーメント推定誤差  $M_{n\_exp\_estm\_err}$  を求める。なお、第 $n$ ノード拡張床反力モーメント推定誤差を決定する上で必要となる前記ベクトル  $R(j)$  は、各ノードの重みを基に決定される。

次いで、次式45のように、所定の係数マトリックス  $K_{n\_cmpl}$  を第 $n$ ノード拡張床反力モーメント推定誤差  $M_{n\_exp\_estm\_err}$  に乗算することにより、第 $n$ ノード拡張傾斜角の補正量の候補値である第 $n$ ノード拡張傾斜角補正量候補値  $\theta_{n\_inc\_cand}$  を求める。

1 3 2

$$\theta_{n\_inc\_cand} = K_{n\_cmpl} * M_{n\_exp\_estm\_err} \quad \cdots \text{式 4 5}$$

なお、 $K_{n\_cmpl}$  は、対角行列とは限らない。

- 5      次いで、ベクトル  $R(j)$  ( $j=1,2,\cdots r-1$ ) に対する係数を  $\theta_{n\_inc\_cand}$  の第  $j$  要素として、ベクトル  $R(j)$  を線形結合したベクトルを求め、これをもって、第  $n$  ノード相対床高さ偏差の補正量の候補値である第  $n$  ノード相対床高さ偏差補正量候補値  $Z_{n\_inc\_cand}$  とする。

すなわち、次式 4 6 によって、 $Z_{n\_inc\_cand}$  を求める。

10

$$Z_{n\_inc\_cand} = H_n * \theta_{n\_inc\_cand} \quad \cdots \text{式 4 6}$$

- 以上のごとく、第  $n$  ノード床反力推定誤差  $F_{n\_estm\_err}$  から第  $n$  ノード相対床高さ偏差補正量候補値  $Z_{n\_inc\_cand}$  を求めるまでの処理を  
15      図 5 6 のものから図 5 7 のものに置き換えればよい。

上記以外の図 5 7 の演算処理は、図 5 6 の演算処理と同様である。

- また、第 5 参考例における床高さ偏差の推定処理のサブルーチン処理では、第  $n$  ノードの子ノード数が 4 以上の場合の処理が必要となる。この処理は、前記 3 子ノード用床形状推定処理（図 4 1 を参照）を拡張し、  
20      該 3 子ノード用床形状推定処理と同様に、いずれかの子ノード  $j$  に対応する接地部位が浮いて発散してしまいそうな場合には、推定第  $j$  ノード相対床高さ偏差  $Z_{j\_rel\_estm}$  を前回値  $Z_{j\_rel\_estm\_p}$  に維持する（第  $j$  ノード相対床高さ偏差補正量候補値  $Z_{j\_inc\_cand}$  を 0 とする）。また、それ以外の子ノードの推定ノード相対床高さ偏差  $Z_{k\_rel\_estm}$  を前回  
25      推定第  $k$  ノード相対床高さ偏差  $Z_{k\_rel\_estm\_p}$  と  $Z_{n\_inc\_cand}$  との和にある所定のバイアス値  $c$  を加えた値に近づくように決定する。ただし、



バイアス値  $c$  は、第  $n$  ノードのすべての子ノードの推定ノード相対床高さ偏差の重み付き平均が 0 になるように決定される。

以上のごとく、床形状の推定処理を、4 個以上の子ノードを持つノードがある場合にも、拡張することができる。ただし、このような処理を行なうよりは、4 個以上の子ノードを持たないように、階層構造を決定した方が、演算処理は容易となる。

以上説明した第 1 ～ 第 5 参考例を基礎として、以下に本発明の実施形態を説明する。

#### 10 [第 1 実施形態]

次に、本発明の第 1 実施形態に係る移動ロボットの制御装置を図 5 8 ～ 図 6 5 を参照して説明する。図 5 8 および図 5 9 は、第 1 実施形態に係る脚式移動ロボット 5 1（本実施形態では 2 足移動ロボットとする）が後述する膝関節 5 6 の部位を床に付けた状況（ひざまずいた状況）を側面示で示している。なお、図 5 8 ではロボット 5 1 を線状のリンクの連結体として模式化して示している。

本実施形態に係わる発明目的は、膝、肘、胴体など、ロボットの脚や腕の先端部以外の部分が床あるいは床に固定（設置）された対象物（床の延長物と考えられる対象物）と接触する状態において、該対象物を含む床から受ける反力（外力）を操作して、ロボットの姿勢を安定に制御することにある。

より具体的には、ロボットがひざまずいた状態やいすに座った状態における姿勢制御を可能とすることにある。

従来の公知の人間型ロボットには、例えば膝には、床反力を検出するセンサが備えられておらず、膝に作用する床反力を制御することはできなかった。例えば従来の人間型ロボットでは、図 5 8 および図 5 9 のよ

## 1 3 4

うにロボットをひざまずかせた状態では、左右の膝に作用する床反力は、床の凹凸に依存（支配）され、また、床の凹凸に応じて、脚の関節角を調節することが行われていなかった。このため、床の凹凸によって、ロボットの床との接地部位が揺れるなど、その接地部位の接地状態が不安定なものとなる場合もあった。そして、このような状態では、ロボットの動作や作業を行おうとするとロボットの姿勢が不安定にある場合があった。

また、例えばロボットがひざまずいた状態から立ち上がる場合に、実際の床の傾きが目標歩容で想定していた傾きと異なっていた場合には、ロボットの重心位置が適切に制御されず、ロボットの上体の姿勢が傾いたまま立ち上がろうとしてしまうために、該ロボットが転倒してしまう恐れもあった。

また、ロボットが椅子に座ったまま、その姿勢を安定に保ちつつ動作や作業を行う場合において、椅子から立ち上がる時、あるいは椅子に座る時に、ロボットの姿勢を適切な姿勢に復元できるようにするために、ロボットの各脚の足平に作用する床反力のみならず、椅子からロボットの臀部に作用する反力も適切に制御できることが望ましい。

なお、概念的には、椅子などのように床に固定設置された対象物も床の一部と考えれば、前記反力も広義の床反力であると言える。

第1実施形態は、以上のごとき従来方式の問題点に鑑み、前記問題点を解消し、移動ロボットの膝、肘、胴体、臀部など、脚や腕の先端部以外の部分が、床あるいは床の延長物と考えられる対象物と接触して反力を受ける状態において、前記した階層型コンプライアンスの制御を使用しつつ、ロボットの脚や腕の先端部に作用する反力のみならず、脚や腕の先端部以外の部分に作用する反力をも適切に制御し、移動ロボットの姿勢を安定に保つことを可能としたものである。

## 1 3 5

以下に、図 5 8 および図 5 9 に示すロボット（2 足移動ロボット） 5 1 を例にとって、第 1 実施形態をより具体的に説明する。

まず、ロボット 5 1 の機構的構成を説明すると、このロボット 5 1 では、上体（基体） 5 3 の下端部から 2 つの脚（リンク機構） 5 2（一方の脚は図示を省略している）が延設されている。また、上体 5 3 の上部から 2 つの腕（リンク機構） 5 4（一方の腕は図示を省略している）が延設されている。各脚 5 2 は、上体 5 3 側の基端部（上体 5 3 との連結箇所）と、中間部と、先端部とにそれぞれ電動モータなどのアクチュエータにより動作する股関節 5 5、膝関節 5 6、足首関節 5 7 を備え、足首関節 5 7 を介して各脚 5 2 の先端部に足平 5 8 が連結されている。同様に、各腕 5 4 は、上体 5 3 側の基端部（上体 5 3 との連結箇所）と、中間部と、先端部とにそれぞれ電動モータなどのアクチュエータにより動作する肩関節 5 9、肘関節 6 0、手首関節 6 1 を備え、手首関節 6 1 を介して手 6 2 が各腕 5 4 の先端部に連結されている。この例では、各脚 2 の各関節 5 5、5 6、5 7 はそれぞれ、例えば 3 自由度、1 自由度、2 自由度をもつ関節となっており、足平 5 8 は上体 5 3 に対して 6 自由度を有する。また、各腕 5 4 の肩関節 5 9、肘関節 6 0、手首関節 6 1 はそれぞれの自由度が、上体 5 3 に対して手 6 2 が 6 自由度以上の自由度を持つように構成されている。

20     なお、ロボット 5 1 の上体 5 3 には、図示を省略するが、前記第 1 参考例などと同様の制御装置 5 0 が搭載されている。また、上体 5 3 の上端には、頭部 6 3 も設けられている。

このロボット 1 では、図 5 8 および図 5 9 のようにロボット 1 をひざまずかせた状態（特定姿勢状態）では、各脚 5 2 の足平 5 8 と各膝関節 5 6 の部位（より詳しくは、膝関節 5 6 の近傍で膝関節 5 6 と足首関節 5 7 とを連結するリンク（脛リンク）の表面部。以下、単に膝という）

と、各腕 5 4 の手 6 2 とが接地部位となる。そして、本実施形態では、  
図 5 9 に示すように、接地部位である膝に外力検出手段である床反力センサ 9 0（荷重センサ）を備えている。この床反力センサ 9 0 の本体（センサ部） 9 2 とスポンジ等の柔軟な部材（弾性体） 9 4 とから構成  
5 され、本体 9 2 を膝（脚のリンク）に固定し、その本体 9 2 の外側を柔軟な部材（弾性体） 9 4 によって覆っている。なお、膝におけるコンプライアンス制御の精度を良くするために、膝を柔軟な部材 9 4 によって覆うだけでなく、その柔軟な部材 9 4 の表面（接地面）を丸く凸面状に形成することが望ましい。こうすることにより、ロボット 5 1 の目標運  
10 動の修正動作と床反力との関係の非線形性が小さくなるので、コンプライアンス制御の制御特性が良くなる。なお、図示は省略するが、足平 5 8 と足首関節 5 7 とは 6 軸力センサなどの床反力センサとコンプライアンス機構とを介して連結されている。同様に手 6 2 と手首関節 6 1 とは図示を省略する 6 軸力センサなどの床反力センサとコンプライアンス機構とを  
15 介して連結されている。それらの連結構成は、公知のものでよい。

膝関節の接地部位の床反力センサ 9 0 としては、以下のいずれでも良い。

- 1) 接地部位の床への接触面（接地面）に垂直な方向の並進力だけを検出するセンサ
- 20 2) 接地部位の床への接触面（接地面）に垂直な方向の並進力だけでなく該接触面に垂直な方向以外の方向の並進力も検出するセンサ
- 3) 分布圧センサ
- 4) 並進力以外にモーメントも検出するセンサ（例えば 6 軸力センサ）

25 また、荷重を直接的に検出するものでなくとも、前記柔軟な部材 9 4 の変形（ひずみ）を検出する変位センサを用いても良い。

本実施形態においては、床反力センサ 90 として、上記 2) のセンサを用いることとする。コンプライアンス制御の精度をより一層高めるためには、床反力センサ 90 として、上記 3) または 4) のセンサを用いれば良い。なお、膝の構造としては、本出願人が先に提案した特開 2000-62760 号公報に示すごとく、ばねを備えた保護パッド（膝の保護のためのパッド）に床反力センサを追加したものにしても良い。

また、図示は省略するが各脚 52 と各腕 54 の先端部には、6 軸力センサなどの外力検出手段が設けられている。

本実施形態では、上記のようにひざまずいたロボット 51 に対して、  
10 図 61 に示す如く階層構造を設定している。すなわち、接地部位としての右足平 58、左足平 58、右膝、左膝、右手 62、左手 62 をそれぞれ葉ノードである第 1 ノード、第 2 ノード、第 3 ノード、第 4 ノード、第 5 ノード、第 6 ノードに対応させる。また、第 1 ノードと第 2 ノードとを子ノードとして持つ第 12 ノード、第 3 ノードと第 4 ノードを子ノードとして持つ第 34 ノード、第 5 ノードと第 6 ノードを子ノードとして持つ第 56 ノード、並びに第 12 ノードと第 34 ノードを子ノードとして持つ第 1234 ノードを中間ノードとして設定した。さらに、第 1234 ノードと第 56 ノードを子ノードとして持つ第 123456 ノードを根ノードとして設定した。また、各ノードには、前記第 1 参考例などと同様の方針によって、図示の如く、目標床反力中心点  $Q_n$  ( $n=1,2,3,4,5,6,12,34,56,1234,123456$ ) が対応づけられる。なお、根ノードである第 123456 ノードの目標床反力中心点  $Q_{123456}$  は、目標全床反力中心点  $P$  と同一である。

本実施形態では、制御装置 50 は、前記図 2 に示したものと同様の機  
25 能的構成を有するものとされている。

この場合、本実施形態における歩容生成装置 100 が出力する目標歩

容のうちの目標運動の目標接地部位軌道は、各手 6 2 の目標位置姿勢軌道と各足平 5 8 の目標位置姿勢軌道と各膝の目標位置軌道とから構成される。この場合、歩容生成装置 1 0 0 は、想定した床面上で足平 5 8 と手 6 2 と膝が歩容に対する要求通りに接地するように、目標足平位置姿勢（目標第 1、2 接地部位位置姿勢）と目標手位置姿勢（目標第 5、6 接地部位位置姿勢）と目標膝位置（目標第 3、4 接地部位位置）を優先的に決定し、次いで目標 Z M P（目標全床反力中心点）を各接地部位の目標接地点（あるいは目標接地線もしくは目標接地面）を含む最小凸多角形である支持多角形内に決定し、次いで、目標上体位置姿勢を、ロボット 1 の動力学モデルを使用して、目標足平位置姿勢と目標手位置姿勢と目標膝位置と目標 Z M P とを満足するように決定する。

なお、頭部 6 3 が上体 5 3 に対して可動である場合には、その頭部 6 3 の目標位置姿勢軌道が目標運動に含まれる。

また、図 2 のロボット幾何学モデル（逆キネマティクス演算部） 1 1 0 の演算処理は、本実施形態では、後述するように、第 1～第 3 参考例と異なる。

また、本実施形態では、階層型コンプライアンス動作決定部 1 1 4 は、その一部の処理手法が前記第 1～第 3 参考例で説明したものと相違する。図 6 2 は、本実施形態の階層型コンプライアンス動作決定部 1 1 4 の機能的構成を示している。この機能的構成の処理において、第 1～第 3 参考例と相違する主な点を説明すると、補償全床反力モーメント分配器 1 1 4 a は、各中間ノードおよび根ノードのノード補償床反力モーメントだけでなく、葉ノードのうちの第  $n$  ノード ( $n=1,2,5,6$ ) のノード補償床反力モーメント  $Mn\_dmd$ 、すなわち、目標第  $n$  接地部位床反力中心点 ( $n=1,2,5,6$ ) まわりの要求床反力モーメント（姿勢復元用の要求モーメント）も決定して出力する。これは、ロボット 5 1 では、接地部位とし

ての足平 5 8 および手 6 2 にその目標床反力中心点まわりにモーメント発生できるからである。なお、これらの要求モーメントを含めたノード補償床反力モーメント  $Mn\_dmd$  の決定手法は、前記第 1 および第 2 参考例で説明した手法と同じでよい。また、本実施形態では、補償全床反力モーメント分配器 1 1 4 a は、ノード補償床反力モーメントをそれぞれに対応する各ノードの目標床反力中心点まわりに発生させることによって修正される、目標第  $n$  接地部位床反力中心点 ( $n=1,2,5,6$ ) まわりの修正目標第  $n$  接地部位床反力モーメント  $Mn\_refmdfd(n=1,2,5,6)$  を、修正目標接地部位床反力の並進力成分  $Fn\_refmdfd(n=1,2,3,4,5,6)$  と共に決定して出力する。これらは、機構変形補償量算出部 1 1 4 n で機構変形補償量を算出するために使用される。

また、補償角決定部（図 6 2 の仮想線で囲んだ部分）は、本実施形態では、各中間ノードおよび根ノードの補償角だけでなく、葉ノードのうちの第  $n$  ノード ( $n=1,2,5,6$ ) のノード補償角  $\theta n$  も決定して出力する。

これらの第  $n$  ノード補償角  $\theta n(n=1,2,5,6)$  を決定する  $\theta n$  決定部は、特開平 1 0 - 2 7 7 9 6 9 号公報に示した足平補償角決定部と同様の処理によって、第  $n$  ノード補償角  $\theta n(n=1,2,5,6)$  を決定する。なお、これらのノード以外の各中間ノードおよび根ノードの補償角  $\theta n(n=12,34,56,1234,123456)$  の決定手法は、前記第 1 および第 2 参考例で説明した手法で同じでよい。

また、本実施形態における修正目標接地部位位置姿勢算出部 1 1 4 g は、前記第 1 および第 2 参考例で説明した手法によって、各第  $n$  ノード補償角  $\theta n(n=12,34,56,1234,123456)$  を基にしたノードの回転操作を合成することによって、目標接地部位位置を修正し、さらに、第  $n$  ノード補償角  $\theta n(n=1,2,5,6)$  を基に、第  $n$  接地部位 ( $n=1,2,5,6$ ) の目標姿勢を修正し、これによって、各接地部位の修正目標接地部位位置姿勢を求める。

また、本実施形態では、床形状推定器 130 は、前記第 3 参考例で説明した手法と同じ手法で推定第  $n$  床高さ偏差  $Z_{fn\_estm}(n=1,2,3,4,5,6)$  を求めることに加えて、第  $n$  接地部位の接地部位床傾斜偏差  $\theta_{fn}(n=1,2,5,6)$  を推定する。この接地部位床傾斜偏差  $\theta_{fn}$  の推定は、特  
5 開平 10-277969 号公報に示した床形状推定器の足平床傾斜を推定する処理と同様の処理によって行なわれる。

本実施形態の階層型コンプラインス動作決定部 114 の、上記した以外の機能的構成の処理手法は、第 3 参考例のものと同一である。

以上説明した相違点を除けば、本実施形態における制御装置 50 の演  
10 算処理は、第 1～第 3 参考例と同様である。

次に、本実施形態における前記ロボット幾何学モデル 110 の処理に関して詳説する。

本実施形態のロボット 51 においては、上体 53 から膝に至るまでの関節の自由度の数が 3 しかないので（股関節 55 に 3 自由度あるだけなので）、厳密に上体位置姿勢と足平位置姿勢と左右の膝の水平位置と左  
15 右の膝の高さの和とをそれらの目標に維持したまま、左右の膝の高さの差だけを変えることはできない。言い換えると、強引に左右の膝の高さの差だけを変えようとする、接地部位（すなわち膝および足平）と床との間でこじりあるいは滑りが生じてしまう。

20 同様に、厳密に上体位置姿勢と両膝の位置と両足平の水平位置と左右の足平の高さの和とをそれらの目標に維持したまま、左右の足平の高さの差だけを変えることはできない。言い換えると、強引に左右の足平の高さの差だけを変えようとする、接地部位（すなわち膝および足平）と床との間でこじりあるいは滑りが生じてしまう。

25 同様に、厳密に上体位置姿勢と足平位置姿勢と左右の膝の水平位置と左右の膝の高さの差とをそれらの目標に維持したまま、左右の膝の高さ



の和だけを変えることはできない。言い換えると、強引に左右の膝の高さの和だけを変えようとする、接地部位（すなわち膝および足平）と床との間でこじりあるいは滑りが生じることはなくとも、上体位置が目標位置からずれる。その結果、ロボット 51 の全体の重心位置と慣性力とが目標値からずれ、ロボット 51 の安定性が低下する。

すなわち、いずれにせよ、階層型コンプライアンス動作決定部 1.14 において決定された機構変形補償付き修正目標接地部位位置姿勢と目標上体位置姿勢とを同時に厳密に満足することはできないので、ロボット 51 の図 5.8 および図 5.9 の姿勢状態において、該ロボット 51 の足平 5.8 もしくは膝と床との間でこじりあるいは滑りが生じたり、ロボット 51 の全体の重心位置と慣性力とが目標値からずれ、ロボット 51 の安定性が低下したりする。なお、接地部位のうちの手 6.2 は、上体 5.3 に対して 6.自由度以上の自由度を持つので、腕 5.4 の手 6.2 以外の部位で床に接地するような姿勢をロボット 51 に採らせない限り、手 6.2 と床との間でこじりなどの滑りが発生することは無い。

そこで、本実施形態においては、ロボット 51 の接地部位のうちの膝および足平 5.8 と床との間で極力こじりあるいは滑りが生じず、かつ上体 5.3 の重心位置（特に水平位置）が極力変わらないようにしつつ、左右の膝の高さの差の変化などに応じて上体 5.3 の姿勢、あるいは姿勢と位置とを修正することとする。

図 6.3 (a), (b) に、その上体 5.3 の姿勢の修正動作の例を示す。なお、図 6.3 (c) については後述する。これらの図 6.3 (a), (b), (c) では、腕 5.4 と頭部 6.3 は図示を省略している。

上体 5.3 の姿勢の修正動作の 1 つは、図 6.3 (a) に示すようにロボット 51 がひざまずいた状態から、コンプライアンス制御による左右の膝の高さの差の変化に応じて、図 6.3 (b) に示すように、おおよそ上

体 5 3 の重心 G を通る体幹軸を回転軸として、上体 5 3 を回転させる（矢印  $y_1$  のように回転させる）動作である。

また、図 6 3 のようなロボット 5 1 の膝付き姿勢においては、左右の足平 5 8， 5 8 の高さの差の変化によって、左右の膝の高さの差はおおよそ左右の足平 5 8， 5 8 の高さの差の変化の半分だけ変化する。そこで、コンプラインス制御による左右の足平 5 8， 5 8 の高さの差の変化に応じて、左右の膝の高さの差の変化に応じた上体 5 3 の姿勢修正と同様の動作を、左右の足平の高さの差の変化の場合に較べて半分の量だけ行なうようにする。

- 10 さらに、このように上体 5 3 の姿勢を修正するとき、接地部位（膝および足平 5 8）と床との間で極力こじりあるいは滑りが生じず、かつ上体 5 3 の重心 G 位置（特にその水平位置）、あるいはその重心 G と全床反力中心点と結ぶ線分の傾きが極力変わらないようにしつつ、コンプライアンス制御による左右の膝の高さの和の変化に応じて上体 5 3 の位置と姿勢とを修正することとする。
- 15

- 図 6 4 に、左右の膝の高さの和の変化に応じて上体 5 3 の位置と姿勢とを修正する動作を視覚的に示す。すなわち、点線で示すロボット 5 1 の姿勢から、実線で示すロボット 5 1 の姿勢のように、コンプライアンス制御により両膝を下げる動作に伴い、上体 5 3 の下端部（あるいは腰部）を矢印  $y_3$  で示す如く前方側にずらし、上体 5 3 の傾きを矢印  $y_2$  で示す如く後ろに（上体 5 3 の起立方向に）ずらすようにする。すなわち、上体 5 3 の重心 G 位置（あるいは上体 5 3 の所定の代表点の位置）、特にその水平位置を維持しつつ上体 5 3 を後ろに傾けるようにする。あるいは、該重心 G と目標全床反力中心点 P とを結ぶ線分の傾きを維持しつつ上体 5 3 を後ろに傾けるようにする。また、コンプライアンス制御により両膝を上げる動作に伴い、上記と逆に、上体 5 3 の下端部（ある
- 20
- 25

は腰部)を後ろにずらし、上体の傾きを前にずらすようにする。すなわち、上体重心G位置(あるいは上体の所定の代表点の位置)、特にその水平位置を維持しつつ上体53を前に傾けるようにする。あるいは、該重心Gと目標全床反力中心点Pとを結ぶ線分の傾きを維持しつつ上体53を後ろに傾けるようにする。なお、図64中Q1", Q3"は、それぞれ上記のように上体53の位置姿勢を修正した後の足平58の目標床反力中心点、膝の目標床反力中心点を示しており、この例では、Q1"は修正前の足平58の目標床反力中心点Q1と同じである。

以上が、上体53の姿勢や位置の修正動作の概要である。

10 本実施形態におけるロボット幾何学モデル(逆キネマティクス演算部)110の処理機能を図65のブロック図に示す。

逆キネマティクス演算部110では、まず、機構変形補償入り修正目標第n接地部位位置姿勢( $n=1,2,\dots,6$ )と歩容生成装置100が決定した各足平58および膝の目標接地部位位置姿勢とを基に、歩容生成装置100が決定した左右の膝の目標位置に対する、左右の膝の高さの差の修正量  $Zkneediffmdfd$  および左右の膝の高さの和の修正量  $Zkneesummdfd$  と、歩容生成装置100が決定した左右の足平の目標位置に対する、左右の足平58, 58の高さの差の修正量  $Zfootdiffmdfd$  を求める。

20 具体的には、以下の式47、48、49によって、左右の膝の高さの差の修正量  $Zkneediffmdfd$ 、左右の膝の高さの和の修正量  $Zkneesummdfd$ 、左右の足平の高さの差の修正量  $Zfootdiffmdfd$  を求める。

25  $Zkneediffmdfd$

= 機構変形補償入り修正目標第4接地部位位置

1 4 4

－目標第 4 接地部位位置

－機機構変形補償入り修正目標第 3 接地部位位置

+ 目標第 3 接地部位位置

…式 4 7

5 Zkneesummdfd

= 機機構変形補償入り修正目標第 4 接地部位位置

－目標第 4 接地部位位置

+ 機機構変形補償入り修正目標第 3 接地部位位置

－目標第 3 接地部位位置

10

…式 4 8

Zfootdiffmdfd

= 機機構変形補償入り修正目標第 2 接地部位位置

－目標第 2 接地部位位置

15 －機機構変形補償入り修正目標第 1 接地部位位置

+ 目標第 1 接地部位位置

…式 4 9

20 なお、式 4 7 ～ 4 9 の「部位位置」はより正確には、その「部位位置」の高さ成分（鉛直方向成分）である。

次いで、左右の膝の高さの差の修正量 Zkneediffmdfd、左右の膝の高さの和の修正量 Zkneesummdfd および左右の足平の高さの差の修正量 Zfootdiffmdfd を基に、上体位置姿勢修正量を求める。

25 上体位置姿勢修正量は、膝高さ差用上体位置修正量 Xbkneediffmdfd、膝高さ差用上体姿勢修正量  $\theta$  bkneediffmdfd、膝高さและ用上体位置修正量 Xbkneesummdfd、膝高さและ用上体姿勢修正量  $\theta$  bkneesummdfd お

よび足平高さ差用上体位置修正量  $X_{bfootdiffmdfd}$ 、足平高さ差用上体姿勢修正量  $\theta_{bfootdiffmdfd}$  から成る。具体的にこれらの値は次のように求められる。

まず、左右の膝の高さの差の修正量  $Z_{kneediffmdfd}$  に応じて、これ  
5 によって接地部位（膝および足平 58）と床との間でこじりあるいは滑りが生じないための、膝高さ差用上体位置修正量  $X_{bkneediffmdfd}$  と膝高さ差用上体姿勢修正量  $\theta_{bkneediffmdfd}$  とを、左右の膝の高さの差の修正量  $Z_{kneediffmdfd}$  とその瞬間（現在時刻）におけるロボット 51 の目標姿勢（目標運動）とを基に幾何学演算によって求める。

10 より具体的には、例えば、次式 50 によって、 $X_{bkneediffmdfd}$  と  $\theta_{bkneediffmdfd}$  とを求める。ただし、 $K_{xkneediff}$  と  $K_{thkneediff}$  とは、ロボット 51 の目標姿勢に応じた比例係数である。

$$X_{bkneediffmdfd} = K_{xkneediff} * Z_{kneediffmdfd}$$

$$15 \quad \theta_{bkneediffmdfd} = K_{thkneediff} * Z_{kneediffmdfd}$$

…式 5.0

これ以外にも、あらかじめ、いくつかの代表的なロボット 51 の目標姿勢に対して、左右の膝の高さの差の修正量（あるいは第 34 ノード補償角  $\theta_{34}$ ）と上体位置姿勢の修正量との関係を求めておいて、これを  
20 マップあるいは関数として記憶し、これと左右の膝の高さの差の修正量  $Z_{kneediffmdfd}$  を基に  $X_{bkneediffmdfd}$  および  $\theta_{bkneediffmdfd}$  を求めても良い。なお、本実施形態では、左右の膝の高さの差の修正量に対して、上体 53 をその体幹軸まわり回転させて上体姿勢を修正するので、  
25 膝高さ差用上体位置修正量  $X_{bkneediffmdfd}$  は 0 で良い。

次いで、上記と同様に、左右の足平 58、58 の高さの差の修正量

Zfootdiffmdfd に応じて、これによって接地部位（膝および足平 5 8）と床との間でこじりあるいは滑りが生じないための、足平高さ差用上体位置修正量 Xbfootdiffmdfd と足平高さ差用上体姿勢修正量  $\theta$  bfootdiffmdfd とを、左右の足平の高さの差の修正量 Zfootdiffmdfd と  
 5 その瞬間（現在時刻）におけるロボット 5 1 の目標姿勢（目標運動）とを基に幾何学演算によって求める。

より具体的には、例えば、次式 5 1 によって、Xbfootdiffmdfd と  $\theta$  bfootdiffmdfd とを求める。ただし、Kxfootdiff と Kthfootdiff とは、ロボット 5 1 の目標姿勢に応じた比例係数である。前述したように足平  
 10 5 8 の高さ差の影響は膝の高さの差の影響のほぼ半分であることから、Kxfootdiff と Kthfootdiff とは、それぞれ、Kxkneediff と Kthkneediff の 2 分の 1 とする。

$$Xbfootdiffmdfd = Kxfootdiff * Zfootdiffmdfd$$

$$15 \quad \theta \text{ bfootdiffmdfd} = Kthfootdiff * Zfootdiffmdfd$$

…式 5 1

なお、本実施形態では、左右の足平 5 8，5 8 の高さの差の修正量に対して、上体 5 3 をその体幹軸まわり回転させて上体姿勢を修正するの  
 20 で、足平高さ差用上体位置修正量 Xbfootdiffmdfd は 0 で良い。

次いで、上記と同様に、左右の膝の高さの和の修正量 Zsummdfd に応じて、これによって接地部位（膝および足平）と床との間でこじりあるいは滑りが生じないための、膝高さ差用上体位置修正量 Xbsummdfd と膝高さ差用上体姿勢修正量  $\theta$  bsummdfd とを、左右の膝の高さの和  
 25 の修正量 Zsummdfd とその瞬間（現在時刻）におけるロボット 5 1 の目標姿勢を基に幾何学演算によって求める。

これ以外にも、あらかじめ、いくつかの代表的な目標姿勢に対して、左右の膝の高さの和の修正量と上体姿勢の修正量の関係をおいて、これをマップあるいは関数として記憶し、これと左右の膝の高さの和の修正量  $Z_{summdfd}$  とを基に  $X_{bsummdfd}$  と  $\theta_{bsummdfd}$  とを求めても良い。

5      なお、次のように、上体位置姿勢の修正量を決定してもよい。すなわち、左右の膝の高さの差を、その差を生じさせる第 34 ノード補償角  $\theta_{34}$  に換算し、左右の膝の高さの和を、その和を生じさせる第 1234 ノード補償角  $\theta_{1234}$  に換算し、左右の足平の高さの差を、その差を生じさせる第 12 ノード補償角  $\theta_{12}$  に換算する。そして、これらの換算された補償角を基に、幾何学演算によって上体位置姿勢修正量を決定するようにしても良い。あるいは、あらかじめ、いくつかの代表的なロボット

10      51 の目標姿勢に対して、換算された補償角と上体位置姿勢修正量との関係を求めておいて、これをマップあるいは関数として記憶し、これと換算された補償角とを基に、上体位置姿勢修正量を決定するようにしても良い。

15

次いで、目標上体位置姿勢を上体位置姿勢修正量だけ移動（回転移動と平行移動）して、こじり補正入り目標上体位置姿勢を求める。具体的には、体幹軸（あるいは所定の回転軸（ほぼ鉛直面内の回転軸））まわ

20      りに目標上体位置姿勢を膝高さ差用上体姿勢修正量と足平高さ差用上体姿勢修正量との和（ $\theta_{bkneediffmdfd} + \theta_{bfootdiffmdfd}$ ）だけ回転移動し、さらにこれを左右軸まわりに膝高さ差用上体姿勢修正量  $\theta_{bfootsummdfd}$  だけ回転移動し、さらにこれをロボット 51 の前後方向で膝高さ差用上体位置修正量と膝高さ差用上体位置修正量と足平高さ差用上体位置修正量の和（ $X_{bkneediffmdfd} + X_{bkneesummdfd} + X_{bfootdiffmdfd}$ ）だけ平行移動することによって、こじり補正入り目標

25

上体位置姿勢を求める。

次いで、こじり補正入り目標上体位置姿勢と機構変形補償入り目標第  $n$  接地部位位置姿勢 ( $n=1,2,\dots,6$ ) とを基に、ロボット 51 の関節変位指令を求める。

5      以上のごとく逆キネマティクス演算部 110 の処理が実行される。

すなわち、第1実施形態は、ロボット 51 の接地部位位置姿勢の修正動作のために、幾何学的に自由度が不足している場合には、階層型コンプライアンス動作によって目標接地部位位置姿勢を修正するだけでなく、上体位置の点（上体の代表点）あるいは上体を含む複数部位の重み付き平均位置（この場合の重みは各部位の質量比となっていることが望ましい）の点（全体重心など）、特にその点の水平位置を保持するように、あるいは、その点と目標全床反力中心点（目標 ZMP）とを結ぶ線の角度を目標歩容における角度にできるだけ保持するように、目標上体位置姿勢も修正するようにした。

10

15      また、別の言い方をすれば、ロボット 51 の全体の姿勢制御の安定性を高めるために、目標全床反力中心点（目標 ZMP）まわりに発生する実床反力モーメントの制御性を優先し、ある所定の接地部位 A（ここでは膝）の相対高さまたは傾斜角度の操作量、あるいはある所定の接地部位 A を子孫ノードとして持つノードの相対高さまたは傾斜角度の操作量、  
20      としての補償高さおよび補償角のうちの少なくともいずれか一方を決定する手段と、前記補償高さおよび補償角のうちの少なくともいずれか一方に応じて、上体位置あるいは上体を含む複数部位の前記重み付き平均位置を概ね目標歩容での位置に保持しつつ、上体の姿勢および位置のうちの少なくともいずれか一方の修正量を決定する手段と、前記所定の接  
25      接地部位 A を除く所定の接地部位 B（ここでは足平）の位置および姿勢のうちの少なくともいずれか一方と、前記修正量によって修正した上体位



## 1.49

置姿勢とに基づいて、関節変位を決定する逆キネマティクス演算手段を備えるようにした。

5     なお、第1実施形態では、ロボット51の上体53の体幹軸まわりに上体姿勢を回転させる代わりに、図64(c)のように、鉛直軸を回転軸として、ロボット51の腰(上体53の下端部)を中心に上体53を回転させるようにしても良い。ただし、この場合には、上体53の重心G位置の左右方向へのずれが大きくなる。あるいは、上体53の体幹軸と鉛直軸との中間的な軸を回転軸として上体姿勢を回転させるようにしても良い。あるいは上体53の位置と姿勢とを両膝の高さの差の修正量  
10    や両足平58、58の高さの差の修正量に応じて同時に修正しても良い。また、上体53の重心G位置が変わらないようにする代わりに、ロボット51の全体重心位置あるいは上体53の代表点位置が変わらないように上体53の位置姿勢を修正しても良い。

15    いずれにせよ、コンプライアンス動作などによるロボット51の接地部位位置姿勢の修正動作のために、幾何学的に自由度が不足している場合に、接地部位のこじりなどの滑りが生じないように、上体53の位置および姿勢のうちの少なくともいずれか一方を目標歩容の位置姿勢から修正するようにすればよい。また、上体53の位置および姿勢のうちの  
20    少なくともいずれか一方を修正する代わりに、上体53以外の所定の部位の位置および姿勢のうちの少なくともいずれか一方を修正するようにしても良い。

## [第2実施形態]

25    次いで、本発明の第2実施形態に係る移動ロボットの制御装置を説明する。

第1実施形態においては、接地部位のこじりなどの滑りを防止し、か

つロボット 51 の全体重心位置と慣性力とができるだけずれないようにするために、上体位置姿勢を修正するようにした。本実施形態（第 2 実施形態）においては、接地部位のこじりなどの滑りがある程度までは許容し、優先的にロボット 51 の全体重心位置と慣性力とがずれないように、関節変位（股関節 55 と膝関節 56 の変位）あるいは接地部位位置姿勢を修正するようにした。

すなわち、本実施形態においては、逆キネマティクス演算部 110 は、第 1 実施形態で説明した図 65 の処理に代えて、図 66 のブロック図で示す処理を行なうようにした。この相違点を除けば、本実施形態は、第 1 実施形態と同じである。

本実施形態の逆キネマティクス演算部 110 を図 66 を参照して説明すると、まず、各機構変形補償入り修正目標第  $n$  接地部位位置姿勢 ( $n=1,2,\dots,6$ )（詳しくは位置姿勢のうちの位置）と各目標第  $n$  接地部位位置姿勢 ( $n=1,2,\dots,6$ )（詳しくは位置姿勢のうちの位置）とを基に、前記式 47、式 48 および式 49 にしたがって左右の膝の高さの差の修正量  $Z_{kneediffmdfd}$ 、左右の膝の高さの和の修正量  $Z_{kneesummdfd}$ 、および左右の足平の高さの差の修正量  $Z_{footdiffmdfd}$  を求め、さらに、左右の膝の高さの差を、その差を生じさせる第 34 ノード補償角  $\theta_{34}$  に換算する。同様に、左右の膝の高さの和を、その和を生じさせる第 1234 ノード補償角  $\theta_{1234}$  に換算し、左右の足平の高さの差を、その差を生じさせる第 12 ノード補償角  $\theta_{12}$  に換算する。

次いで、換算された各ノード補償角を基に、関節変位修正量を決定する。これは次のように行なわれる。まず、目標歩容の上体位置姿勢を固定し、且つ目標全床反力中心点（目標第 123456 ノード床反力中心点（図 61 の点 P））とロボット 51 の全体重心（あるいは、上体重心、あるいは、上体 53 を含む複数の部位の重心）とを結ぶ線分の角度が変

わらないようにしつつ、関節変位を修正した場合を想定し、この場合に、各接地部位（膝および足平 5 8）に対応した第  $n$  ノード ( $n=12, 34, 1234$ ) の傾斜角度（補償角）が単位摂動量になるための第  $j$  関節変位修正量 ( $j=1, 2, \dots$ , 関節の総数) を求め、これを第  $n$  ノード補償角に対する第  $j$  5 関節変位の感度  $L_{n,j}$  とする。

より一般的には、目標歩容の関節変位を修正した場合に、目標全床反力中心点（目標第 123456 ノード床反力中心点）とロボット 5 1 の全体重心（あるいは、上体重心、あるいは、上体 5 3 を含む複数の部位の重心）を結ぶ線分と、各接地部位（膝および足平 5 8）に対応した第  $n$  ノード ( $n=12, 34, 1234$ ) の傾斜角度との間の相対角度が単位摂動量になるための第  $j$  関節変位修正量 ( $j=1, 2, \dots$ , 関節の総数) を求め、これを第  $n$  ノード補償角に対する第  $j$  関節変位の感度  $L_{n,j}$  とする。 10

具体的には、 $L_{n,knee\_r}$  を第  $n$  ノード補償角 ( $n=12, 34, 1234$ ) に対する右膝関節変位の感度、 $L_{n,knee\_l}$  を第  $n$  ノード補償角に対する左膝 15 関節変位の感度、 $L_{n,hip\_r}$  を第  $n$  ノード補償角に対する右股ピッチ関節変位の感度、 $L_{n,hip\_l}$  を第  $n$  ノード補償角に対する左股ピッチ関節変位の感度とすると、図 5 8 および図 5 9 に示すロボット 5 1 の膝付き姿勢においては、各感度は次式 5 2 のように設定する。

$$\begin{aligned}
 20 \quad & L_{1234\_hip\_r} = 0, \quad L_{1234\_hip\_l} = 0, \quad L_{1234\_knee\_r} = 1, \\
 & L_{1234\_knee\_l} = 1, \quad L_{12\_hip\_r} = 0, \quad L_{12\_hip\_l} = 0 \\
 & L_{12\_knee\_r} = a_{12}, \quad L_{12\_knee\_l} = -a_{12}, \quad L_{34\_hip\_r} = a_{34} \\
 & L_{34\_hip\_l} = -a_{34}, \quad L_{34\_knee\_r} = 0, \quad L_{34\_knee\_l} = 0 \\
 & \dots \text{式 5 2}
 \end{aligned}$$

25 ただし、 $a_{12}$ 、 $a_{34}$  は所定の定数である。

次いで、次式 5 3 ～ 5 6 により各関節変位修正量を決定する。ただし、

1 5 2

$\theta$  knee\_r は、右膝関節変位修正量、 $\theta$  knee\_l は、左膝関節変位修正量、  
 $\theta$  hip\_r は、右股関節変位修正量（より詳しくは、右股関節のピッチ方向の関節変位修正量）、 $\theta$  hip\_l は、左股関節変位修正量（より詳しくは、左股関節のピッチ方向の関節変位修正量）とする。

5

$$\begin{aligned} \theta \text{ knee}_r = & L1234\_knee\_r * \theta 1234 + L12\_knee\_r * \theta 12 \\ & + L34\_knee\_r * \theta 34 \end{aligned}$$

…式 5 3

$$\begin{aligned} \theta \text{ knee}_l = & L1234\_knee\_l * \theta 1234 + L12\_knee\_l * \theta 12 \\ & + L34\_knee\_l * \theta 34 \end{aligned}$$

10

…式 5 4

$$\begin{aligned} \theta \text{ hip}_r = & L1234\_hip\_r * \theta 1234 + L12\_hip\_r * \theta 12 \\ & + L34\_hip\_r * \theta 34 \end{aligned}$$

…式 5 5

$$\begin{aligned} \theta \text{ hip}_l = & L1234\_hip\_l * \theta 1234 + L12\_hip\_l * \theta 12 \\ & + L34\_hip\_l * \theta 34 \end{aligned}$$

15

…式 5 6

20 なお、他の関節変位修正量も同様に求めるが、説明を容易にするために、ここでは省略する。

すなわち、第 1234 補償角  $\theta 1234$  に対しては、図 6 7 に示すごとく両膝関節 5 6 の変位（角度）を  $\theta 1234$  と同量だけ修正する。また、第 12 補償角  $\theta 12$  に対しては、右膝関節 5 6 の変位（角度）を  $\theta 12$  に比例して修正しつつ、左膝関節 5 6 の変位（角度）を右膝関節 5 6 の変位  
 25 の修正量に  $-1$  を乗じた量だけ修正する。つまり右膝関節 5 6 の変位（角度）を図 6 7 に示すごとく修正し、左膝関節 5 6 の変位（角度）は

その逆に修正する。また、第 34 補償角  $\theta_{34}$  に対しては、右股関節 55 のピッチ方向の変位（角度）を  $\theta_{34}$  に比例して修正し、左股関節 55 のピッチ方向の変位（角度）を右股関節 55 のピッチ方向の変位の修正量に  $-1$  を乗じた量だけ修正するようにした。つまり右股関節 55 のピ  
5 ッチ方向の変位（角度）を図 68 に示すごとく修正し、左股関節 55 のピッチ方向の変位（角度）はその逆に修正する。なお、図 67 の  $Q1$ ,  $Q1''$  はそれぞれ上記のような関節変位の修正前の足平 58 の目標床反力中心点、修正後の足平 58 の目標床反力中心点を示している。また、図 68 の  $Q3$ ,  $Q3''$  はそれぞれ上記のような関節変位の修正前の膝の目標  
10 床反力中心点、修正後の膝の目標床反力中心点を示している。

このような関節変位の修正により、目標全床反力中心点（目標第 123456 ノード床反力中心点）とロボット 51 の全体重心（あるいは、上体重心、あるいは、上体 53 を含む複数の部位の重心）を結ぶ線分と、接地部位（膝および足平 58）に対応した第  $n$  ノード ( $n=12, 34, 1234$ ) の  
15 傾斜角度との間の相対角度が、前記換算された各ノード補償角  $\theta_{12}$ ,  $\theta_{23}$ ,  $\theta_{1234}$  だけ変化する。したがって、実床反力が忠実に制御され、ロボット 51 の姿勢安定性および接地性が向上する。

上記の如く関節変位指令（目標関節変位）を直接修正する代わりに、略同一の目標関節変位を生じさせるために優先的に位置姿勢を修正する  
20 接地部位（具体的には、足平 58、手 62）の修正後の目標位置姿勢である優先修正目標接地部位位置姿勢を決定するようにし、決定された優先修正目標接地部位位置姿勢を基に逆キネマティクス演算によって関節変位指令を決定するようにしても良い。

なお、関節の自由度不足のため、目標上体位置姿勢とすべての修正目  
25 標接地部位位置姿勢とを満足するように逆キネマティクス演算によって関節変位を決定することはできないので、逆キネマティクス演算を行な

うときには、すべての修正目標接地部位位置姿勢のうちの一部の修正目標接地部位位置姿勢を用いることとなる。この一部の修正目標接地部位位置姿勢を前記優先修正目標接地部位位置姿勢と呼ぶ。

たとえば、図67の状況においては、第1234ノード補償角 $\theta_{1234}$ に対しては、膝を中心として目標足平位置を回転移動させた位置を優先修正目標足平位置と決定すれば良い。

なお、第1実施形態および第2実施形態では、一例として、ロボット51のひざまずき状況におけるコンプライアンス動作について説明したが、ロボットが椅子に座った状況でのコンプライアンス動作に適応する場合には、次のようにすれば良い。以下に、それを第3実施形態として説明する。

### [第3実施形態]

図70は本実施形態のロボットの要部の構成を示している。このロボット71は、臀部72の底面部の左右にそれぞれ床反力を検出する床反力センサ73, 73（荷重センサ。例えば6軸力センサ）を備える。なお、左右に床反力センサ73, 73を設ける代わりに、臀部72の底面部の左右に加わる力の合力を検出する1つの床反力センサを備えるようにしてもよい。

この場合、また、床反力センサ73, 73の外側は、図示の如くスポンジ等の柔軟な部材（弾性体）74によって覆われている。なお、臀部72の接地部位におけるコンプライアンス制御の精度を良くするために、柔軟な部材によって覆うだけでなく、図示の如く柔軟な部材（弾性体）74の表面（接地面）を丸く凸面状に形成することが望ましい。特に、ロボット71がその臀部72を介して椅子などに座った状態において床反力センサ73, 73の検知位置（センサ本体の位置）と上記部材74

の凸面の頂点との水平位置を一致させるように、部材 7 4 を設けておくことが望ましい。このようにすることで、ロボット 7 1 の接地部位の位置姿勢の修正動作と床反力との関係の非線形性が小さくなるので、ロボット 7 1 のコンプライアンス制御などの制御特性が良好になる。

5     なお、ロボット 7 1 では、臀部 7 2 の左右の側部から、脚（リンク機構） 5 2, 5 5 が延設されている。脚 5 5, 5 5 の構造は、例えばその関節を含めて前記第 1 実施形態のものと同一とされている。従って、脚 5, 5 5 についての第 1 実施形態と同一の参照符号を用い、説明を省略する。ただし、本実施形態では、脚 5 5 の膝に床反力センサを備えていなくともよい。

10     また、図示のように、臀部 7 2 の上側には、ロボット 7 1 の基体である胴体（上体） 7 7 が設けられ、この胴体 7 7 の上部の両側部から肩関節 7 8, 7 8 を介して腕 7 9, 7 9 が延設されている。なお、腕 7 9 は、前記第 2 実施形態のロボット 5 1 のものと同一構造でもよい。さらに、  
15     胴体 7 7 は、関節 8 0 を介して臀部 7 2 に連結されている。この場合、関節 8 0 は、臀部 7 2 に対して胴体 7 7 をヨー方向に旋回させる胴体旋回用関節 8 0 a と、胴体 7 7 を臀部 7 2 に対して前後および左右方向に傾斜させる胴体屈曲用関節 8 0 b とから構成されている。ロボット 7  
20     1 に上述のように備えられた各関節は、図示しないアクチュエータにより動作する。また、臀部 7 2 または胴体 7 7 には、図示を省略するが、前記第 1 実施形態などと同様の制御装置 5 0 が搭載されている。また、各脚 5 5 および各腕 7 9 の先端部には、6 軸力センサなどの外力検出手段が設けられている。

25     本実施形態では、臀部 7 2 を介して椅子などに腰掛けるロボット 7 1 に対して、図 7 0 に示す如く階層構造を設定すればよい。すなわち、接地部位としての右足平 5 8、左足平 5 8、臀部 7 2 の底面部の右側部

## 156

(右側床反力センサ73の取り付け部位)、臀部72の底面部の左側部  
(左側床反力センサ73の取り付け部位)をそれぞれ葉ノードである第  
1ノード、第2ノード、第3ノード、第4ノードに対応させる。また、  
第1ノードと第2ノードとを子ノードとして持つ第12ノード、第3ノ  
ードと第4ノードを子ノードとして持つ第34ノードを中間ノードとし  
て設定し、第12ノードと第34ノードを子ノードとして持つ第1234ノ  
ードを根ノードとして設定した。また、各ノードには、前記第1実施形  
態などと同様の方針によって、図示の如く、目標床反力中心点  
 $Q_n(n=1,2,3,4,12,34,1234)$ が対応づけられる。なお、根ノードである第  
1234ノードの目標床反力中心点  $Q_{1234}$  は、目標全床反力中心点  $P$  と同  
一である。

本実施形態では、制御装置50は、前記図2に示したものと同様の機  
能的構成を有するものとされている。

この場合、本実施形態における歩容生成装置100が出力する目標歩  
容のうちの目標運動の目標接地部位軌道は、各足平58の目標位置姿勢  
軌道と臀部72の目標位置姿勢軌道とから構成される。目標運動のうち  
の上体位置姿勢軌道は、本実施形態では、胴体77の位置姿勢軌道を意  
味する。なお、目標運動には、各腕79の先端部の位置姿勢軌道も含ま  
れる。また、目標全床反力中心点  $P$  は、実際の床面上ではなく、空中の  
仮想面上にある。

また、本実施形態では、階層型コンプライアンス動作決定部114は、  
その機能的構成要素は、前記第2実施形態のものと同様である(図62  
を参照)。ただし、本実施形態では、補償全床反力モーメント分配器は、  
図70に示した階層構造における各中間ノードおよび根ノードのノード  
補償床反力モーメントと、各足平58に対応する葉ノードのノード補償  
床反力モーメントとを決定して出力する。また、補償角決定部は、図7



0に示した階層構造における各中間ノードおよび根ノードのノード補償角と、各足平58に対応する葉ノードのノード補償角とを決定して出力する。この場合、これらのノード補償床反力モーメントおよびノード補償角の基本的な決定手法は、前記第1～第3参考低や第1実施形態で説明した手法と同じでよい。また、床形状推定器は、前記第1実施形態の場合と同様に、前記第3実施形態で説明した手法と同じ手法で推定第n床高さ偏差  $Z_{fn\_estm}(n=1,2,3,4)$  を求めることに加えて、各足平58の接地部位床傾斜偏差  $\theta_{fn}(n=1,2)$  を推定する。

また、制御装置50の機能的構成要素であるロボット幾何学モデル（逆キネマティクス演算部）は、前記第1実施形態と同様の手法によって、基本的には、前記機構変形補償入り修正目標接地部位位置姿勢と目標上体位置姿勢とを基に、臀部72の接地部位と足平58（接地部位）とでこじりなどの滑りが発生しないように、それらの接地部位の位置姿勢を修正すると共に、上体（胴体）77の位置姿勢を修正する。

以上説明した以外の制御装置50の処理は、前記第2実施形態と同様でよい。

次に、以上説明した実施形態に係わるいくつかの変形態様を説明する。

床反力センサによって直接的に検出できない実ノード床反力は、床反力センサによって直接的に検出される他の実接地部位床反力、加速度センサの検出値、傾斜計の検出値などを用いて、オブザーバにより推定するか、もしくは、簡易的な代数関係によって推定すればよい。例えば、階層型コンプライアンス動作は、目標全床反力中心点まわりに接地部位を回転させる回転型のコンプライアンス動作であるので、コンプライアンス動作を行なっても、ロボットの全体重心の鉛直加速度（あるいは目標全床反力中心点と全体重心とを結ぶ線分の方角の加速度成分）は、ロボットの目標歩容（目標運動）における全体重心の鉛直加速度（あるいは

は目標全床反力中心点と全体重心とを結ぶ線分の方角の加速度成分)にほぼ一致する。したがって、すべての実接地部位床反力鉛直成分の和は、ロボットの目標歩容(目標運動)における全体重心の鉛直加速度と重力加速度との和にロボットの全体質量を乗じた値にほぼ一致する。

- 5 よって、実第  $n$  ノード床反力が直接的に検出できない場合、まず、第  $n$  ノードを先祖ノードに持たず、かつ、第  $n$  ノードそのものでないすべての葉ノードの実床反力(実接地部位床反力)の和(以降、これを実第  $n$  ノード外床反力と呼ぶ)を求める。

- 10 次いで、次式 57 によって、実第  $n$  ノード床反力の推定値である推定第  $n$  ノード床反力を求める。

$$\begin{aligned} & \text{推定第 } n \text{ ノード床反力} \\ & = (\text{目標歩容の全体重心加速度} + \text{重力加速度}) * \text{全体質量} \\ & \quad - \text{実第 } n \text{ ノード外床反力} \end{aligned} \quad \cdots \text{式 57}$$

- 15 上体などに加速度センサを備えている場合には、加速度センサの検出値と、目標歩容および実関節変位のうちの少なくともいずれか一方によりロボット全体の重心加速度(以降、推定全体重心加速度と呼ぶ)を推定し、次式 58 によって、実第  $n$  ノード床反力の推定値である推定第  $n$  ノード床反力を求めても良い。

20

$$\begin{aligned} & \text{推定第 } n \text{ ノード床反力} \\ & = (\text{推定全体重心加速度} + \text{重力加速度}) * \text{全体質量} \\ & \quad - \text{実第 } n \text{ ノード外床反力} \end{aligned} \quad \cdots \text{式 58}$$

- 25 例えば、前記第 6 実施形態において、膝の床反力を検知する床反力センサが備わっていない場合、あるいは、膝の床反力を検知する床反力セ

ンサが故障した場合には、推定第 34 ノード床反力を次式 59 によって求める。

推定第 34 ノード床反力

$$5 \quad = (\text{目標歩容の全体重心加速度} + \text{重心加速度}) * \text{全体質量}$$

－ 実第 34 ノード外床反力

$$= \text{目標歩容の全体重心加速度} * \text{全体質量}$$

－ (実第 12 ノード床反力 + 実第 56 ノード床反力)

…式 59

10

さらに、推定第 34 ノード床反力を実第 34 ノード床反力の代わりに用いて、コンプライアンス動作処理によって第 1234 ノード補償角  $\theta_{1234}$  を決定し、また床形状推定処理によって推定第 1234 ノード相対床高さ偏差  $Z_{1234rel\_estm}$  を推定する。

15 第 34 ノード補償角  $\theta_{34}$  の決定では、想定した床通りであると仮定して、機構変形補償入り修正目標第 3 接地部位位置姿勢、機構変形補償入り修正目標第 4 接地部位位置姿勢と推定第 34 ノード床反力を基に、実第 3 ノード床反力の推定値である推定第 3 ノード床反力と実第 4 ノード床反力の推定値である推定第 4 ノード床反力とを求める。

20 さらに、推定第 3 ノード床反力と推定第 4 ノード床反力を実第 3 ノード床反力と実第 4 ノード床反力の代わりに用いて、コンプライアンス動作処理によって第 34 ノード補償角  $\theta_{34}$  を決定する。

ロボットの姿勢の復元要求モーメント（補償全床反力モーメント）を基に、前述の如く復元要求モーメントを加えることと等価になるように

25 目標ノード床反力中心点まわりの修正目標ノード床反力モーメントを決定する代わりに、復元要求モーメント（補償全床反力モーメント）を基

## 160

に、目標ノード床反力中心点を修正した修正目標ノード床反力中心点を決定しても良い。この場合、目標ノード床反力中心点まわりの目標ノード床反力モーメントは修正しないで0のままとする。

- また、第 $n$ ノード床反力の中で制御できなかった成分（予想される、  
5 または検出された制御偏差成分）を補うために、この成分に応じて、第 $n$ ノードの親ノードの目標床反力を修正しても良い。すなわち、実第 $n$ ノード床反力と目標第 $n$ ノード床反力との差の前回制御周期の値あるいは前記差をローパスフィルタに通した値を第 $n$ ノードの目標床反力に付加しても良い。
- 10 床形状の推定処理においては、コンプライアンス制御用のツリー構造と異なるツリー構造を設定してもよい。そのツリー構造は、根ノードと葉ノードとからなる2層のものであってもよい。また、各ノードの重みもコンプライアンス制御用のものと異なるものとしてもよい。ノード床反力が0となるような時期（そのノードに属する全ての接地部位、また  
15 はそのノードに対応する接地部位が空中を移動する時期）でそのノードの重みが0であれば良い。

また、床形状の推定処理においては、前述の修正目標ノード床反力中心点に基づいて、各修正ノード重みを決定し、これを要素とするベクトルを、床形状推定に用いる重みとして用いても良い。

- 20 床形状推定の処理で、各点（各接地部位）の推定相対床高さ偏差を求める際に、実床反力と機構コンプライアンスモデルと姿勢センサの検出値とを用いる代わりに、コンプライアンス機構などの変形量を検出する変形量検出器を備え、その変形量検出器の検出値と姿勢センサの検出値とを用いるようにしてもよい。

床形状を相対的に推定するだけでなく、グローバルに推定（グローバ

ル座標系での床形状の推定) したい場合には、次のようにしてもよい。

1) ロボットの上体のグローバル座標系での高さ (以下、グローバル高さという) を検知できる場合における床のグローバル高さの推定:

上体などロボットのある所定部位のグローバル高さを検出する検出器

- 5 (加速度センサを用いた上体高さ推定装置 (例えば本願出願人による PCT/J P 0 3 / 0 5 4 4 8 号に記載されている推定装置) あるいは視覚センサ等の外界センサなど) を用いる。推定された上体のグローバル高さと、関節変位 (実関節変位あるいは目標関節変位)、実上体姿勢傾斜の検出値および実床反力の検出値を基に、推定床高さ偏差のグローバル座標系での値を求める。従って、根ノードの推定床高さ偏差は、すべての接地部位のグローバルな推定床高さ偏差の重み付き平均値としての意味を持つこととなる。
- 10

2) 上体のグローバル高さがわからない状況での床のグローバル高さの推定:

- 15 ある推定第  $n$  床高さ偏差のグローバル値 (グループ内相対値ではなく、グローバル座標系における偏差) がわかっているならば、それと推定各相対床高さ偏差を基に、すべての点 (接地部位) の推定床高さ偏差のグローバル値を求める。ロボットの移動のスタート点での推定第  $n$  床高さ偏差のグローバル値がわかっているれば、ロボットの移動を続けること
- 20 で、逐次新しく接地した接地部位の床高さ偏差のグローバル値を求められるので、これを記憶することにより、ロボットの移動軌跡上での床高さのマップを作成できる。

- また、床形状の推定処理においては、前述の修正目標ノード床反力中心点に基づいて、各修正ノード重み (各ノードの重みの値を修正したもの) を決定し、これを、床形状推定において、実第  $n$  ノード相対床高さ
- 25 等を定義するために用いる重みとしても良い。また、床形状推定におい

て、実第  $n$  ノード相対床高さ等を定義するために用いる重みは、目標床反力分配器が決定した前述の重みと必ずしも同一のものにする必要はない。

補足すると、実第  $n$  ノード相対床高さ等を定義するための重みは、目標床反力分配器が決定する重みに必ずしも一致させなくてはならない訳ではないが、一致させるならば、(この場合、自動的に、根ノードの目標床反力中心点は目標全床反力中心点に一致する、) コンプライアンス動作の第  $n$  ノード補償角 ( $n=1,2,\dots$ ) に第  $n$  ノード推定床傾斜偏差を付加するだけで、床形状偏差の影響を打ち消すことができるので、床形状偏差の影響を打ち消すための演算量を低減することができる。

さらに、推定床形状偏差を床形状の地図情報として記憶しておき、次回同一場所を歩行する時に、記憶しておいた床形状の地図情報を基に目標歩容を生成するようにしても良い。

尚、前述の各実施形態における演算処理機能を示すブロック線図もしくはフローチャートにおける演算処理順序を等価変形をしても良い。

#### 産業上の利用可能性

以上の如く、本発明は、脚式移動ロボットの脚の先端部以外の部位を接地させるような状況でも床反力を適切に制御して、高い安定性で円滑な動作を可能とする脚式移動ロボットを提供し得るものとして有用である。

## 請求の範囲

1. 基体と、該基体の移動のために該基体に連結されて外部と接触する複数のリンク機構とを備えると共に、該基体と各リンク機構の先端部との間に、該基体に対して各リンク機構の先端部を可動とする複数の関節が設けられ、前記複数のリンク機構のうちの1つ以上の特定リンク機構の先端部と前記基体との間の所定部位で外部と接触する特定動作姿勢に動作可能な脚式移動ロボットの制御装置において、

前記特定動作姿勢で前記所定部位に作用する外力を検出または推定する外力検出手段と、

10 前記特定動作姿勢における前記所定部位の外力の目標値である目標外力を決定する目標外力決定手段と、

前記検出または推定された外力が前記目標外力に近づくように、少なくとも前記所定部位と前記基体との間に存在する関節の変位を制御する関節制御手段とを備えたことを特徴とする移動ロボットの制御装置。

15 2. 前記特定リンク機構は脚体であることを特徴とする請求の範囲第1項に記載の移動ロボットの制御装置。

3. 前記特定リンク機構は、前記基体に関節を介して連結された臀部から延設された脚体であり、前記所定の部位は、前記臀部であることを特徴とする請求の範囲第1項に記載の移動ロボットの制御装置。

20 4. 前記移動ロボットの前記基体などの第2の所定部位の実姿勢を検出する実姿勢検出手段と、該第2の所定部位の目標姿勢を決定する目標運動決定手段とを備え、前記目標外力決定手段は、少なくとも前記第2の所定部位の実姿勢と目標姿勢との偏差に応じて前記目標外力を決定することを特徴とする請求の範囲第1項に記載の移動ロボットの制御装置。

25 5. 前記移動ロボットの前記基体などの第2の所定部位の実姿勢を検出する実姿勢検出手段と、該第2の所定部位の目標姿勢を決定する目標運

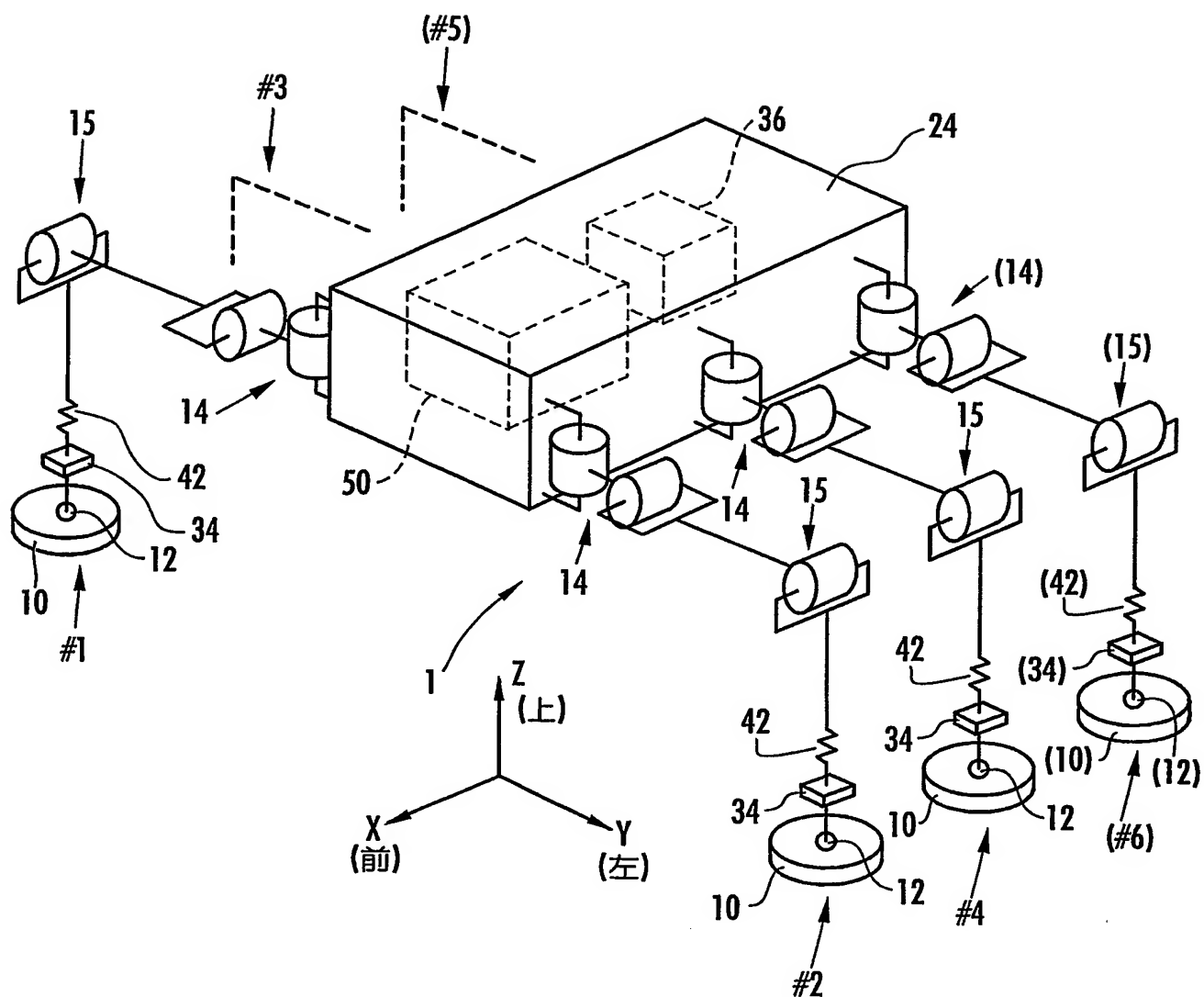
動決定手段とを備え、前記関節制御手段は、前記第2の所定の部位の実姿勢と目標姿勢との偏差に応じて外力の操作量を決定する手段とを備え、前記目標外力と前記外力の操作量との合力に前記検出または推定された外力を近づけるように前記関節の変位を制御することを特徴とする請求

5 の範囲第1項に記載の移動ロボットの制御装置。



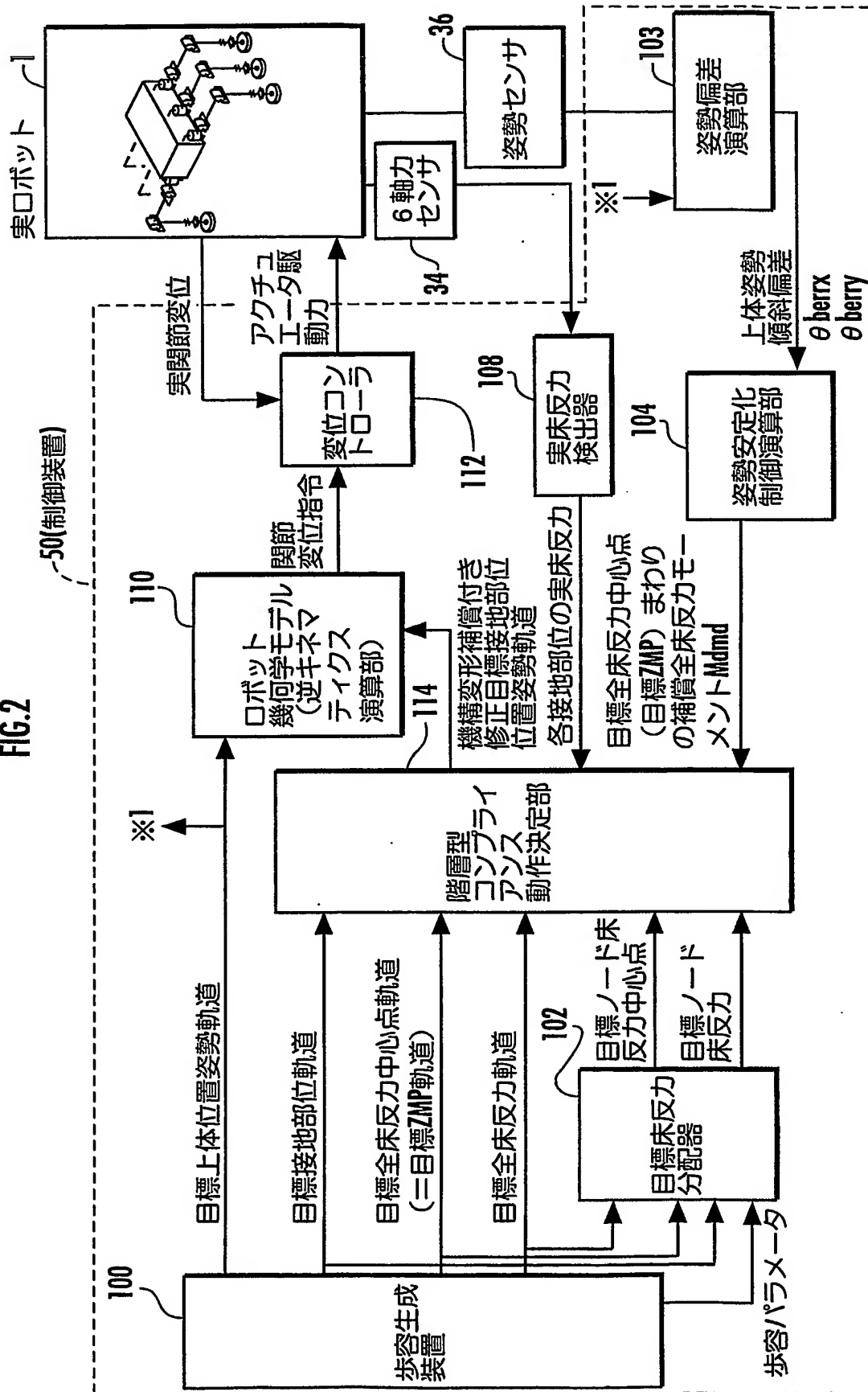
1 / 55

FIG.1



2 / 55

FIG.2



3 / 55

FIG.3(a)

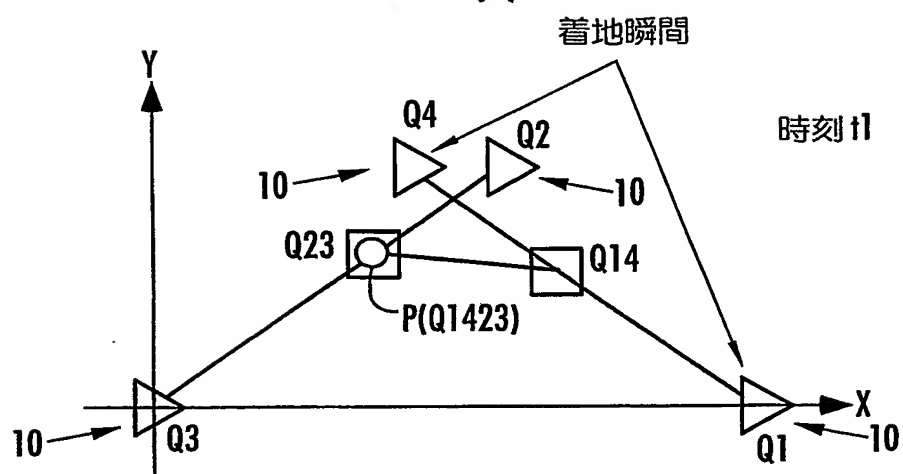


FIG.3(b)

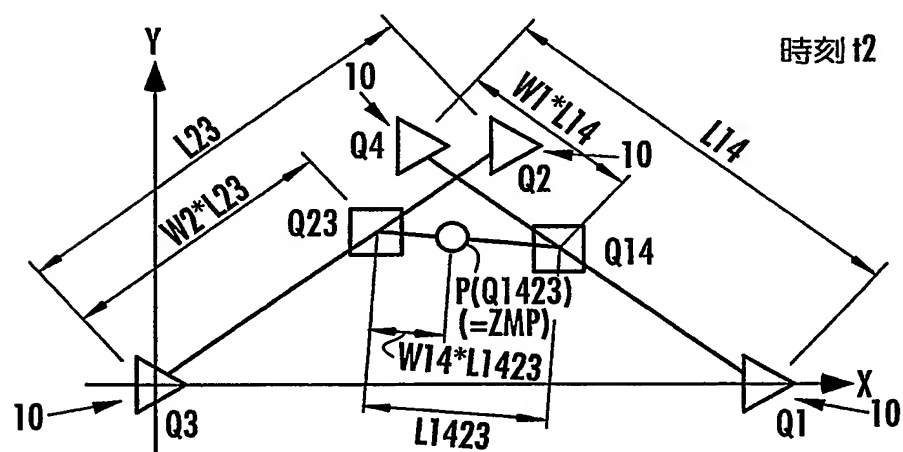
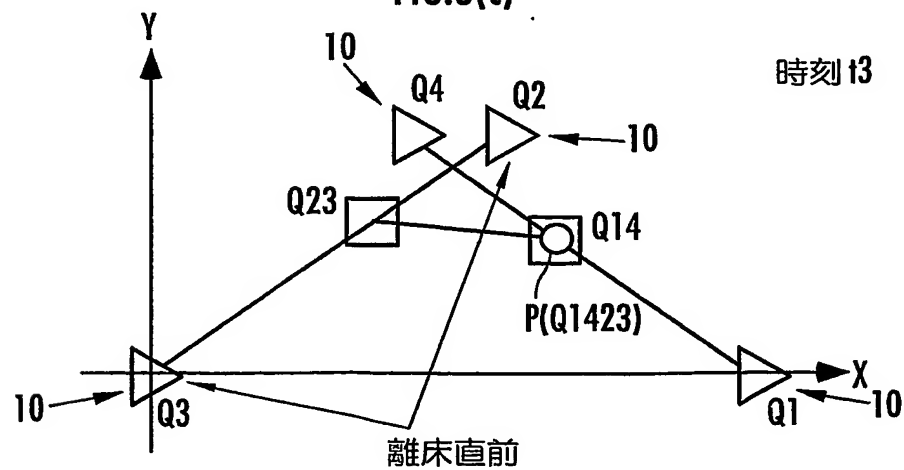


FIG.3(c)



4 / 55  
FIG.4(a)

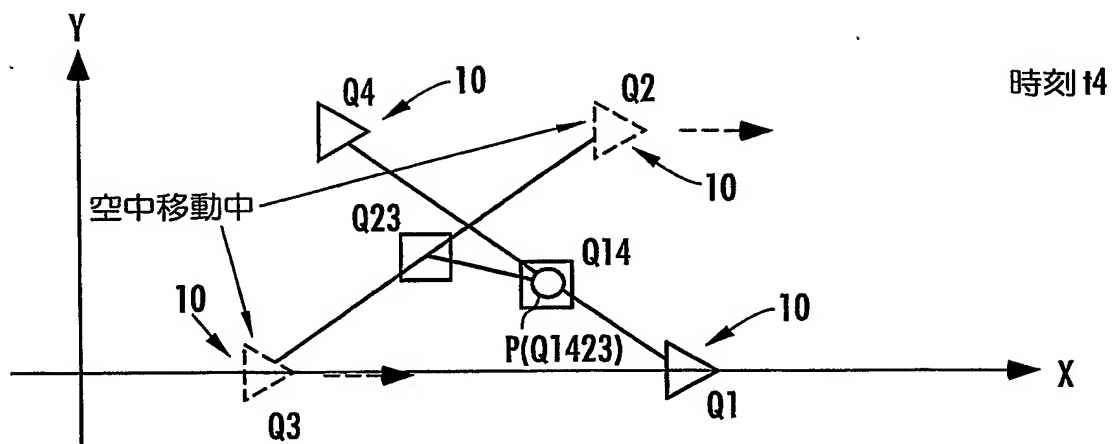


FIG.4(b)

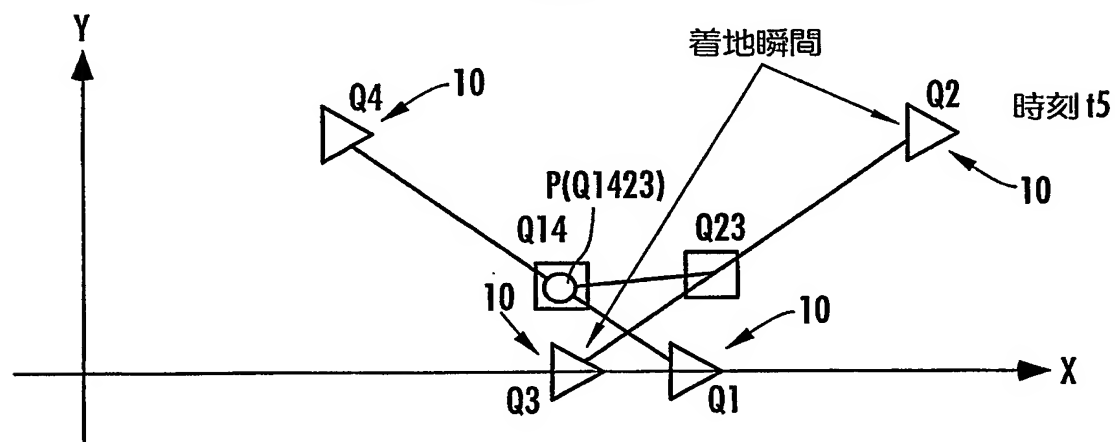
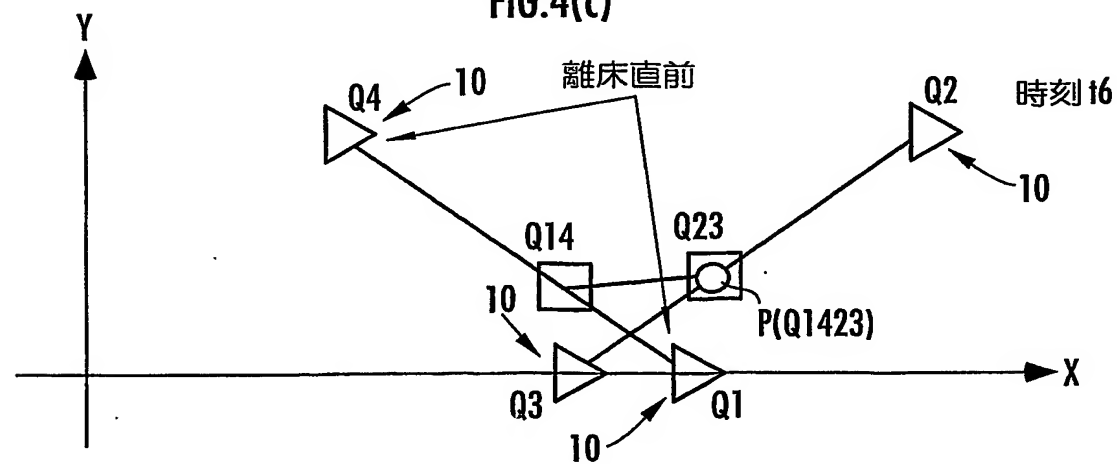


FIG.4(c)



5 / 55

FIG.5(a)

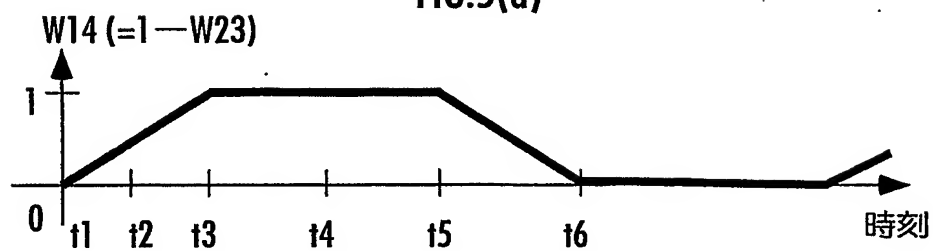


FIG.5(b)

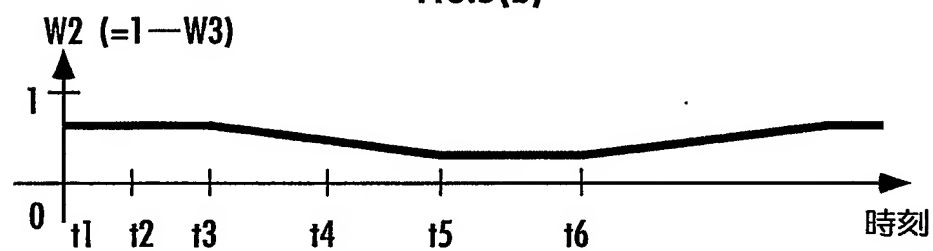


FIG.5(c)

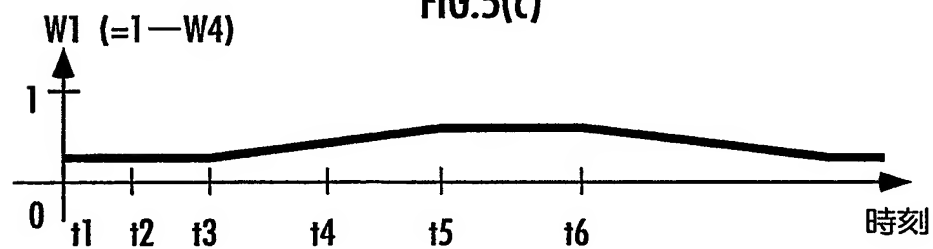
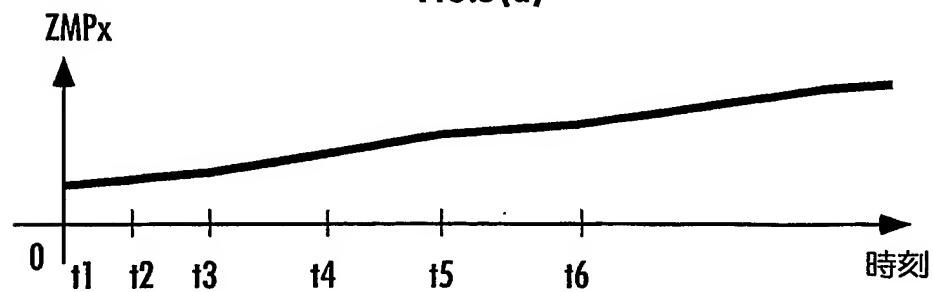


FIG.5(d)



6 / 55

FIG.6

第1423ノード

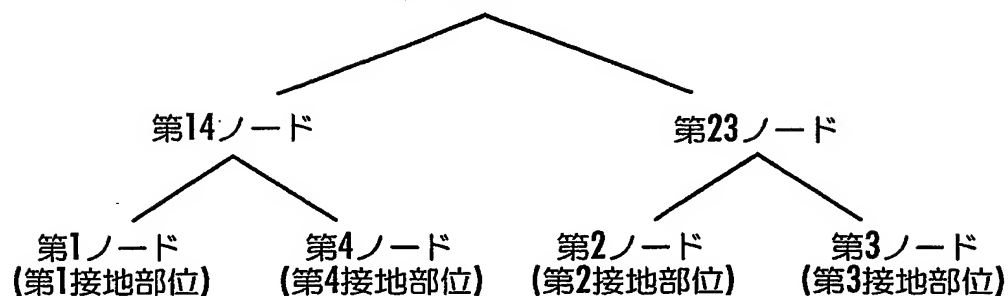
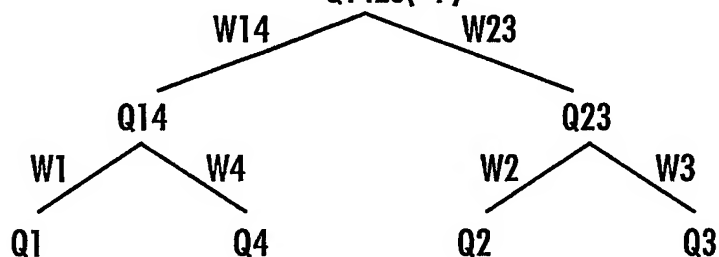


FIG.7

Q1423(=P)



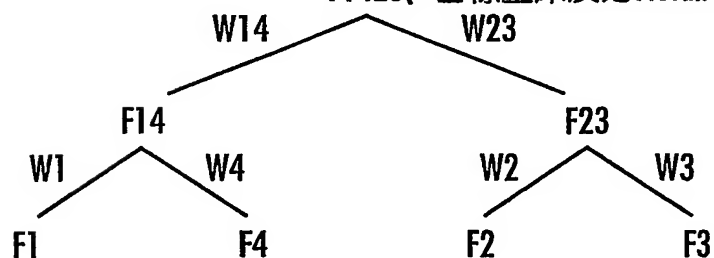
$$Q14 = W1 \cdot Q1 + W4 \cdot Q4$$

$$Q23 = W2 \cdot Q2 + W3 \cdot Q3$$

$$Q1423 = W14 \cdot Q14 + W23 \cdot Q23$$

FIG.8

F1423(=目標全床反力Ftotalref)



$$F1 = W1 \cdot W14 \cdot Ftotalref$$

$$F4 = W4 \cdot W14 \cdot Ftotalref$$

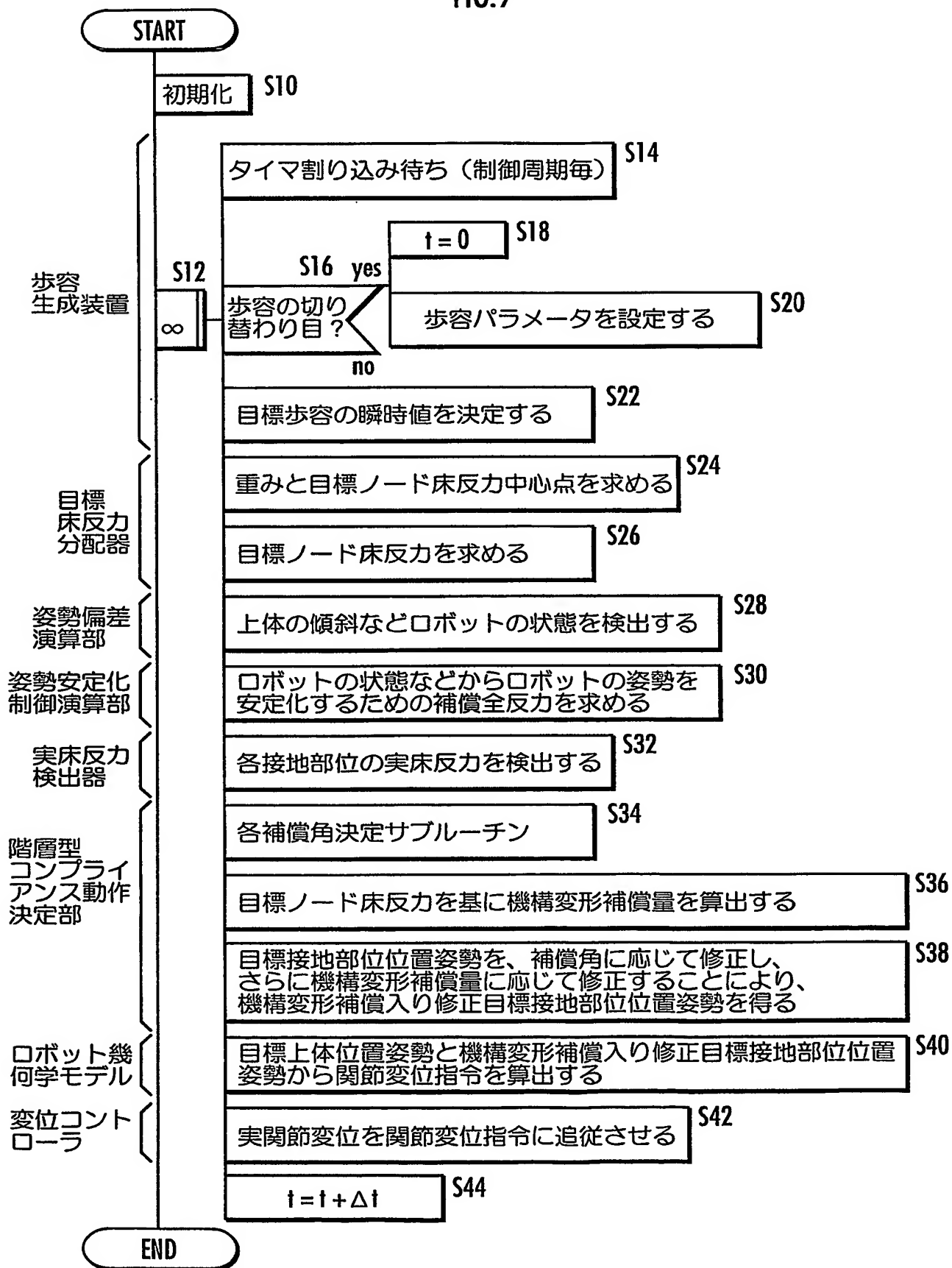
$$F2 = W2 \cdot W23 \cdot Ftotalref$$

$$F3 = W3 \cdot W23 \cdot Ftotalref$$

$$F14 = F1 + F4$$

$$F23 = F2 + F3$$

$$F1423 = F14 + F23$$

7 / 55  
FIG.9

8 / 55

FIG.10

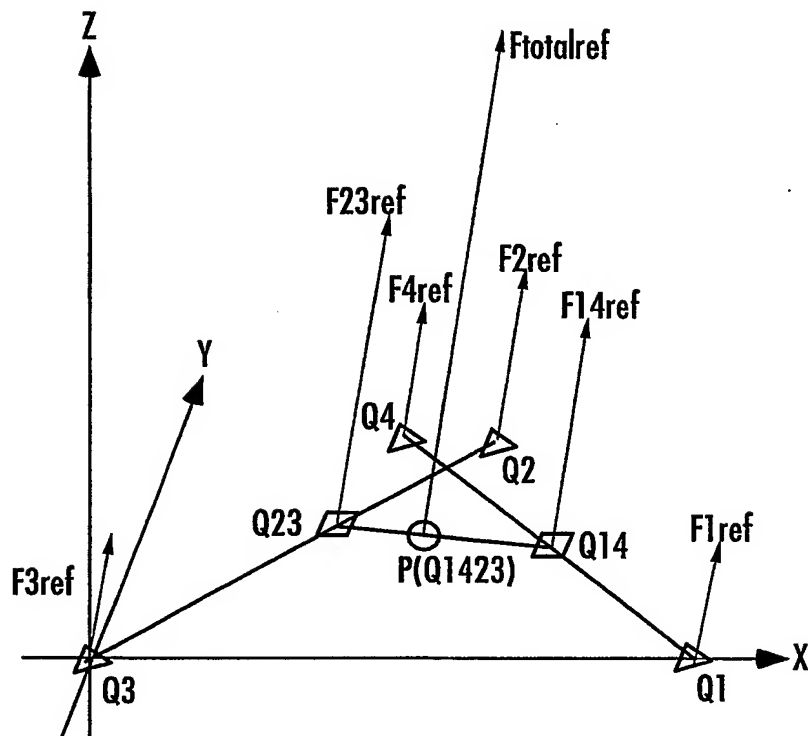
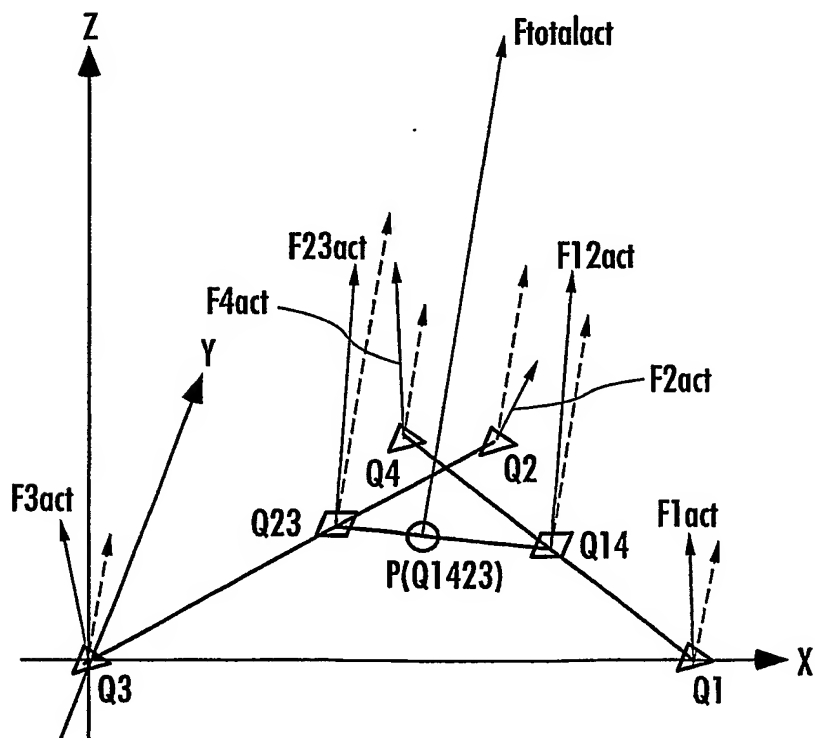


FIG.11





9 / 55

FIG.12

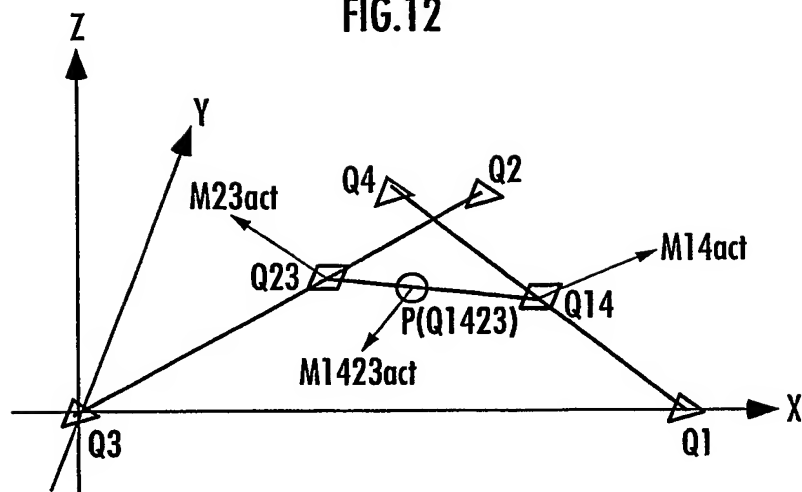


FIG.13

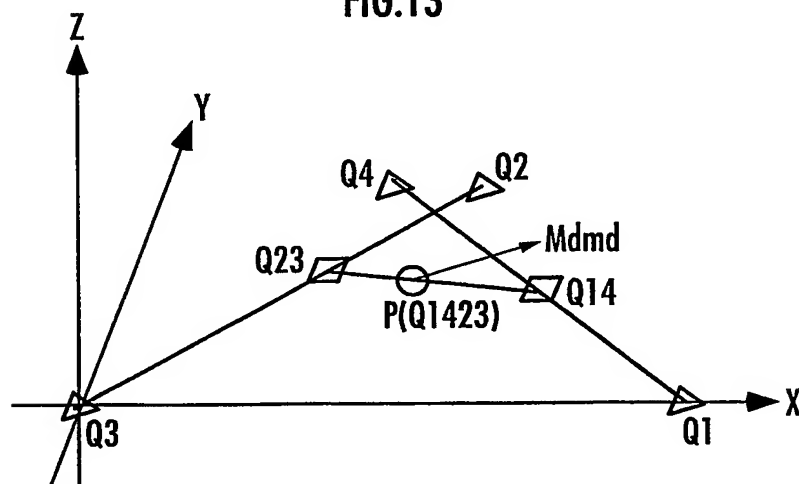
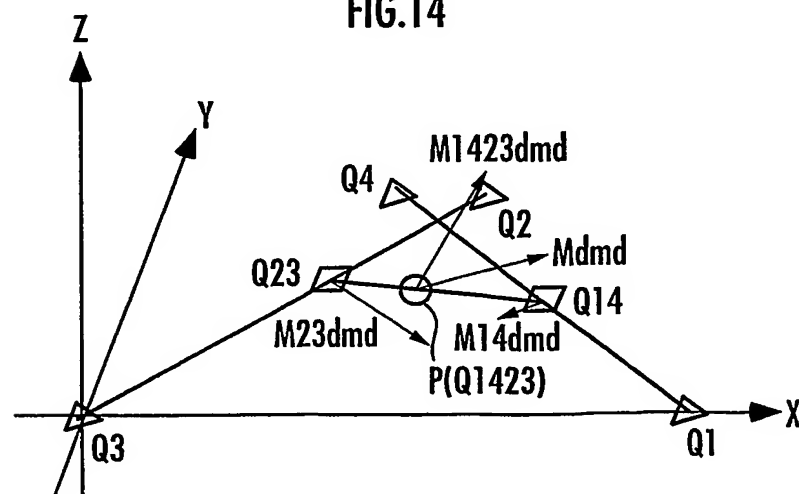


FIG.14



10 / 55

FIG.15

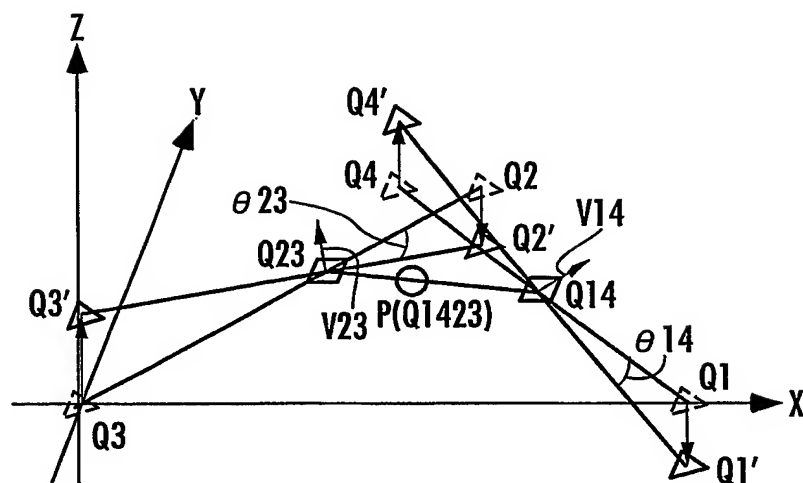


FIG.16

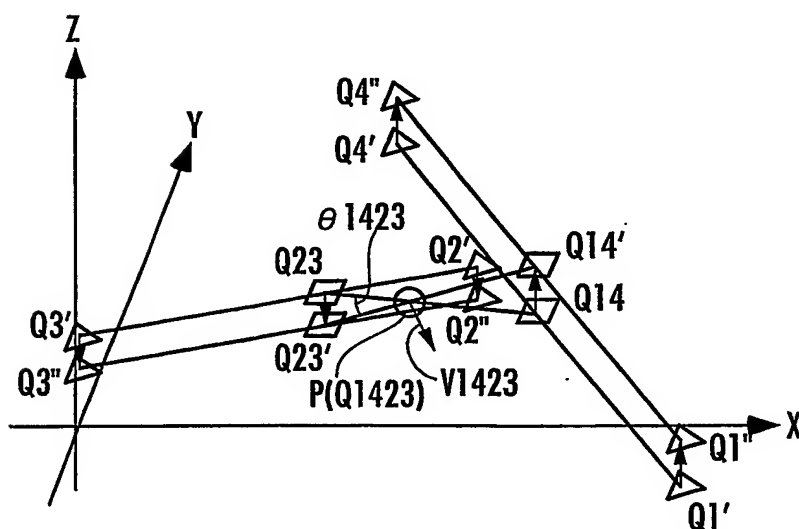
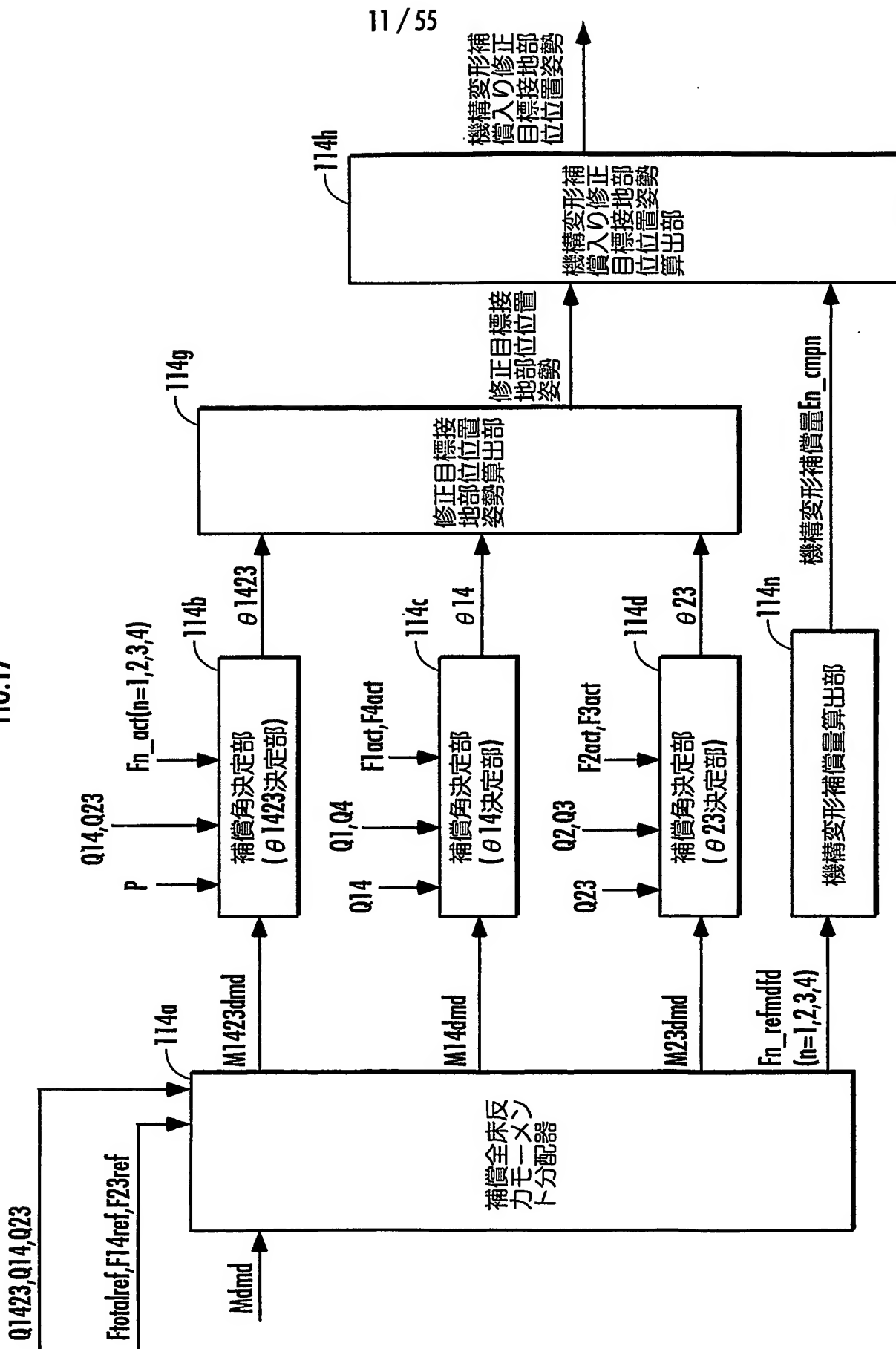
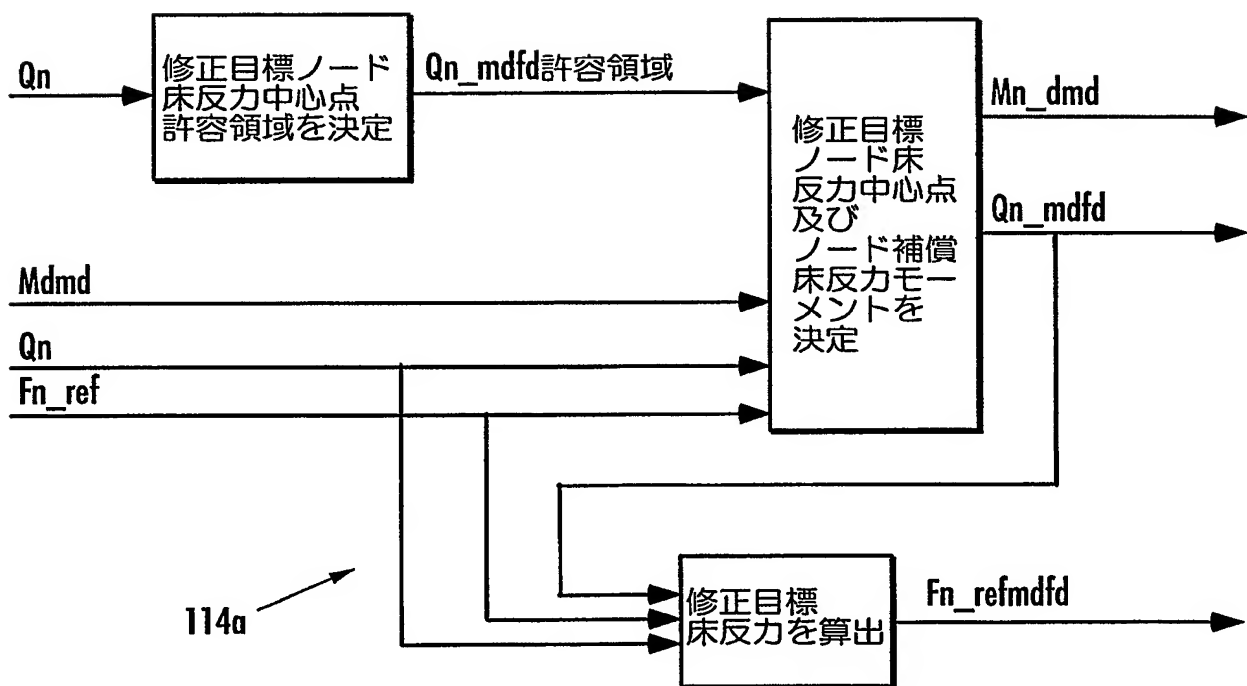


FIG.17



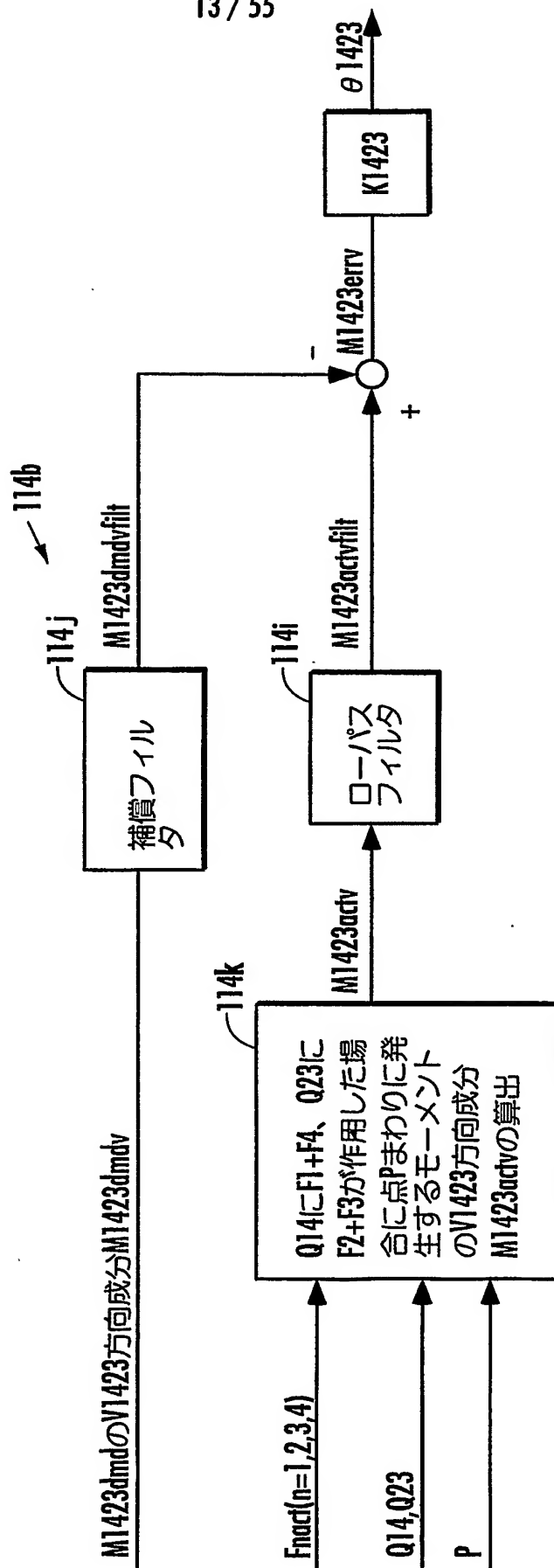
12 / 55

FIG.18



13 / 55

FIG.19



14 / 55

FIG.20

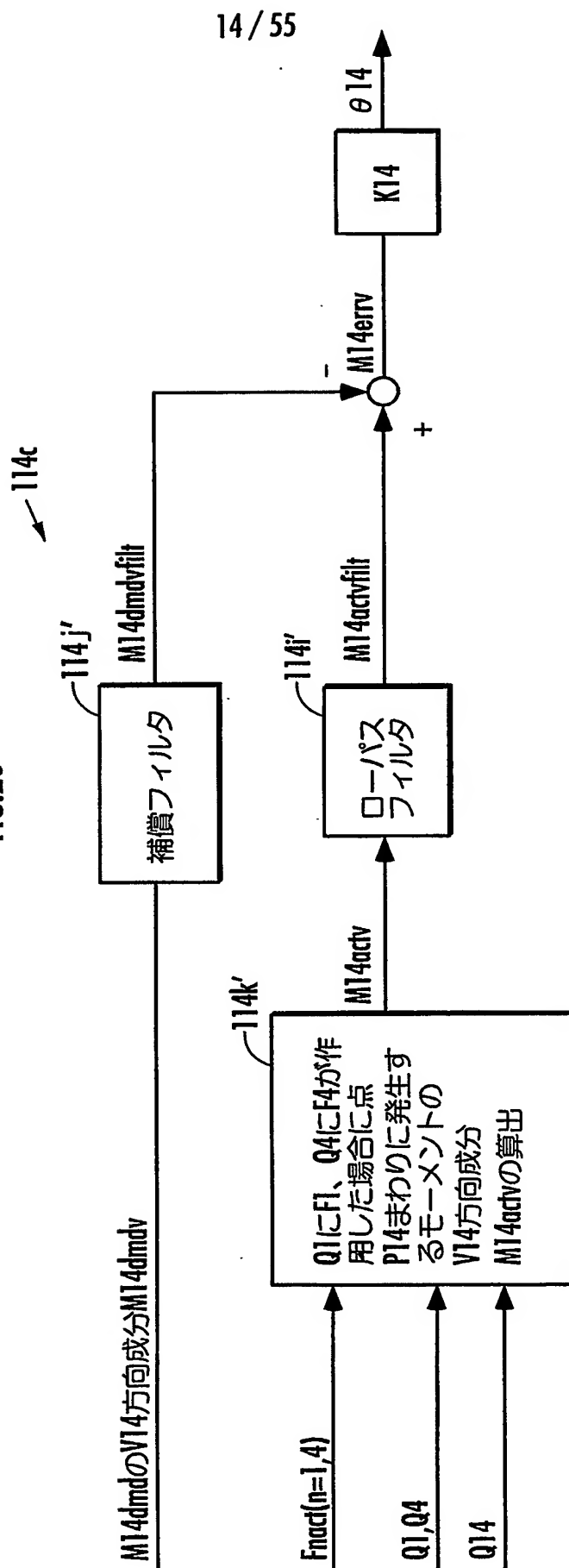
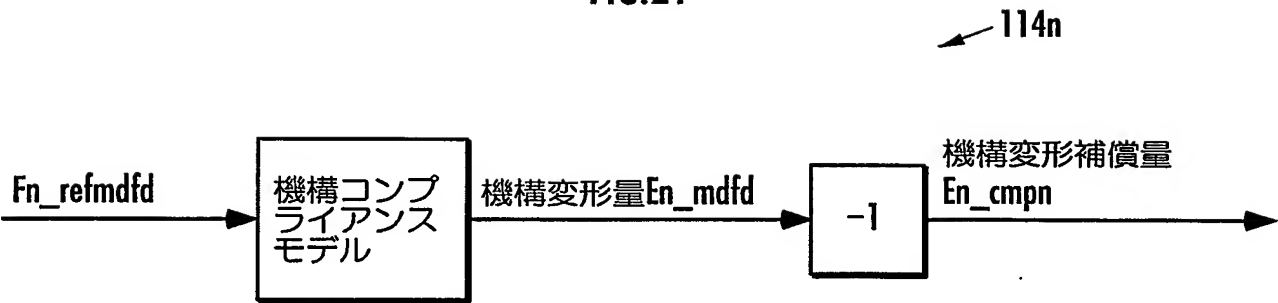


FIG.21



16 / 55

FIG.22

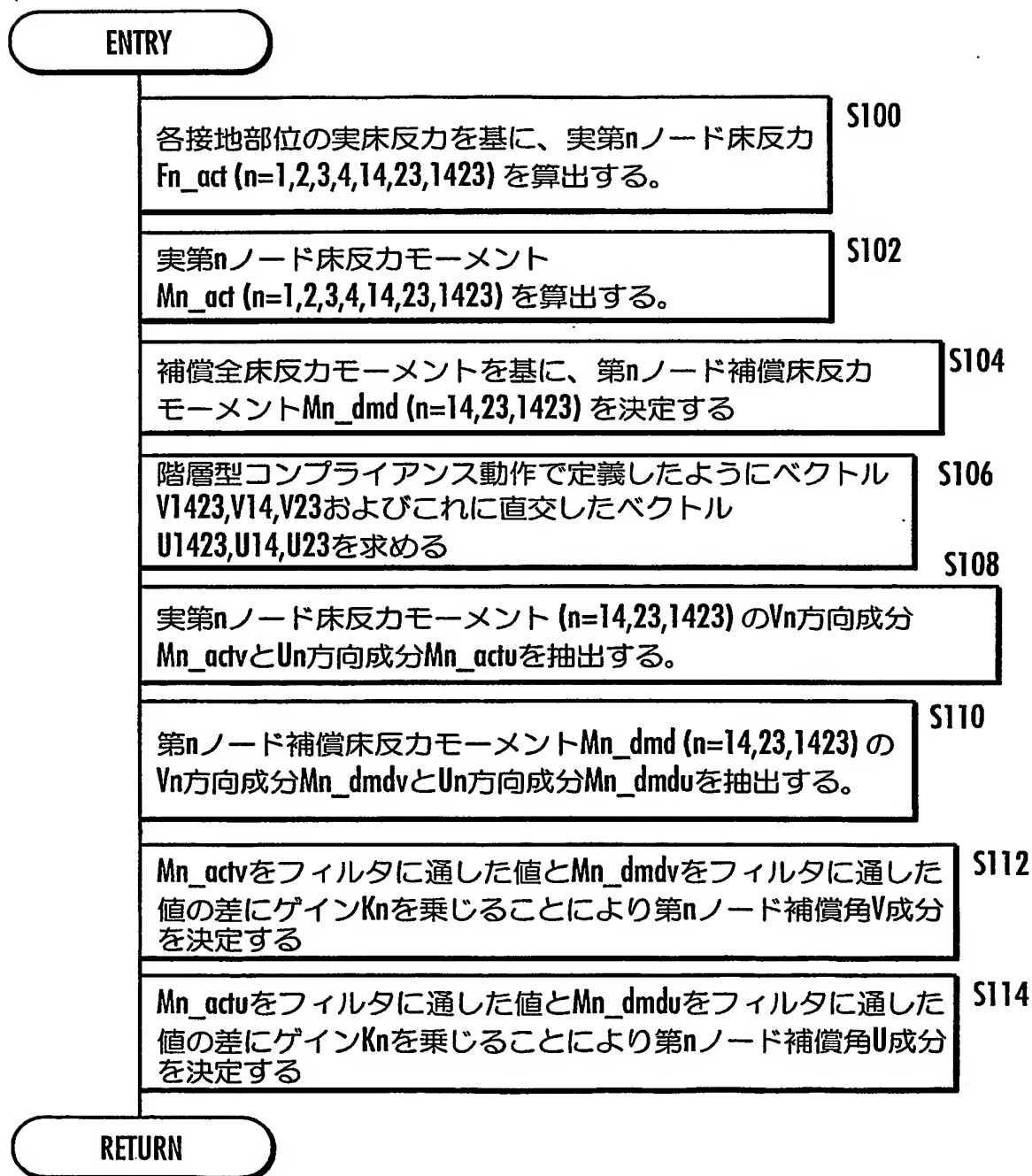
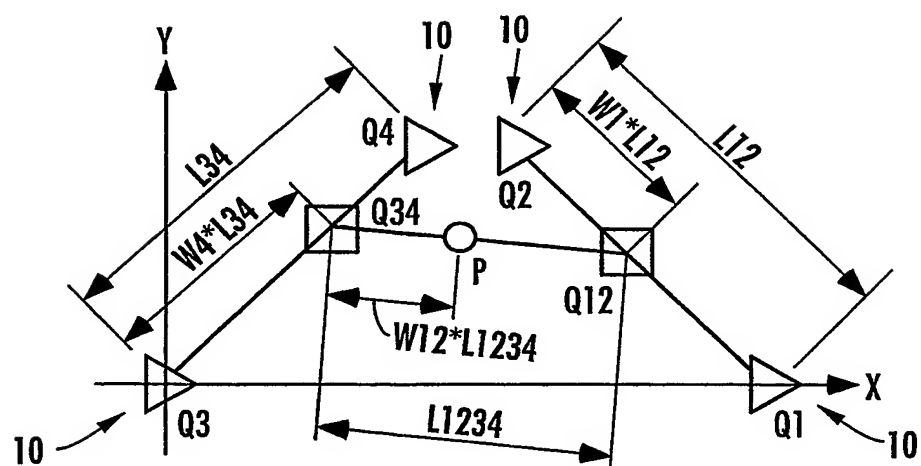


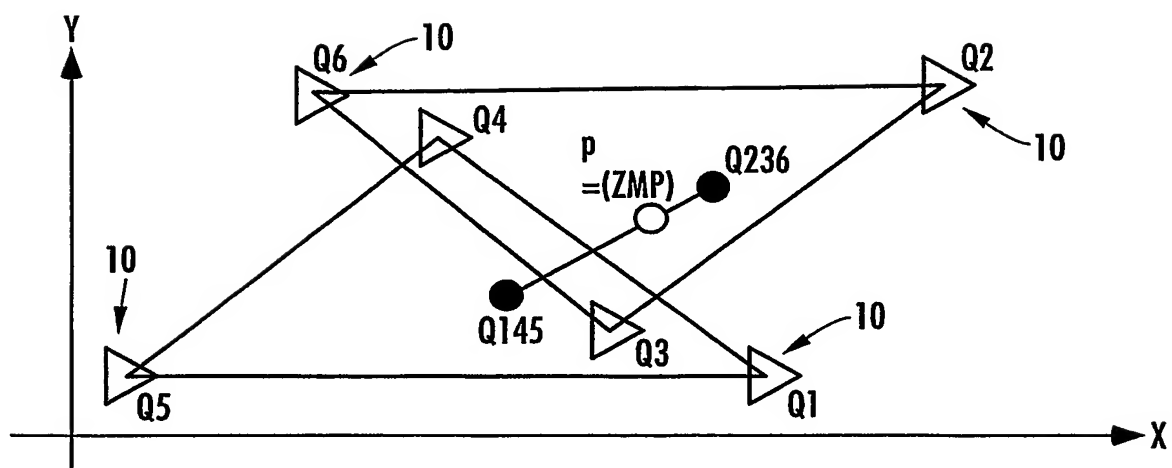


FIG.23



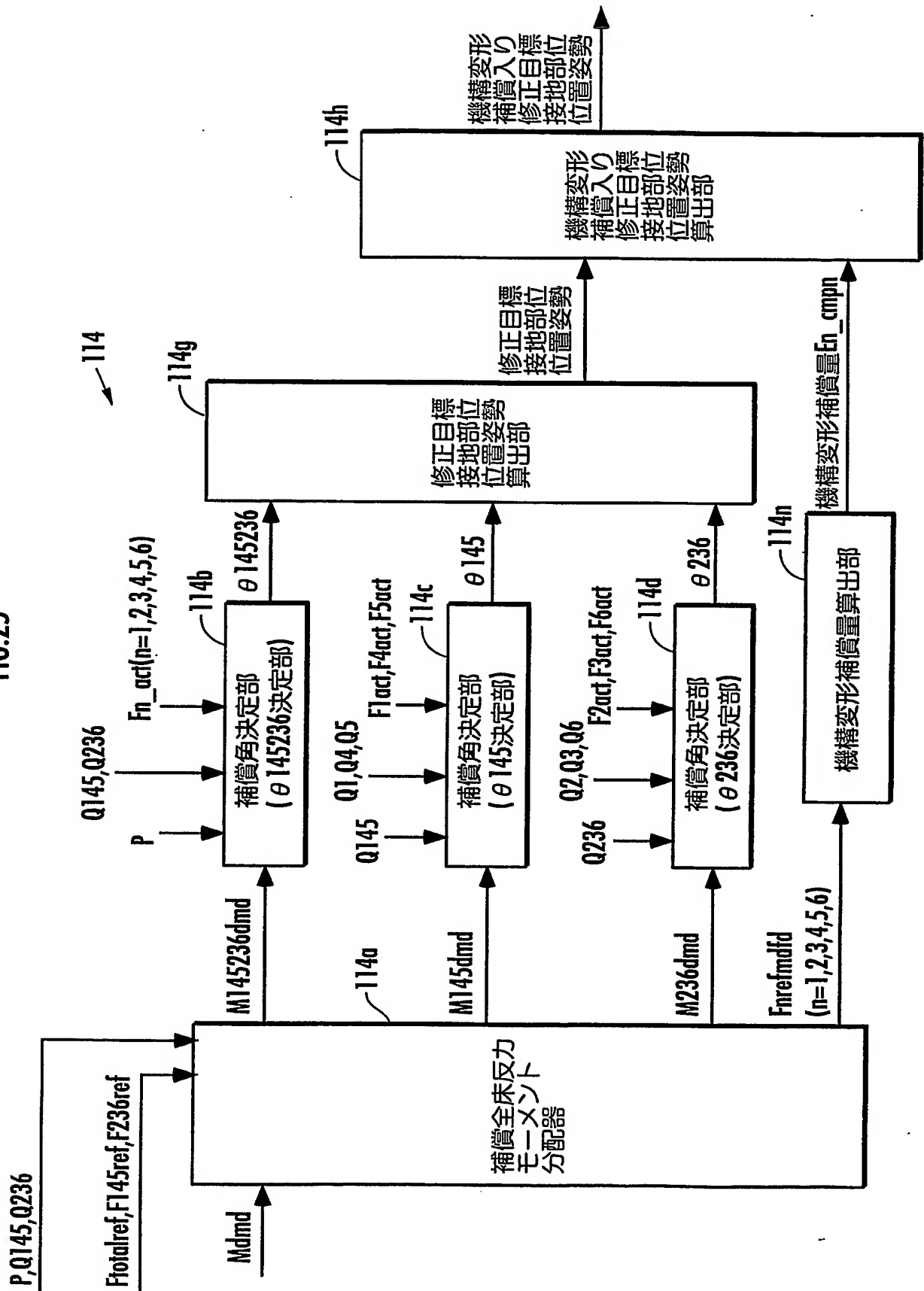
18 / 55

FIG.24



19 / 55

FIG.25



20 / 55

FIG.26

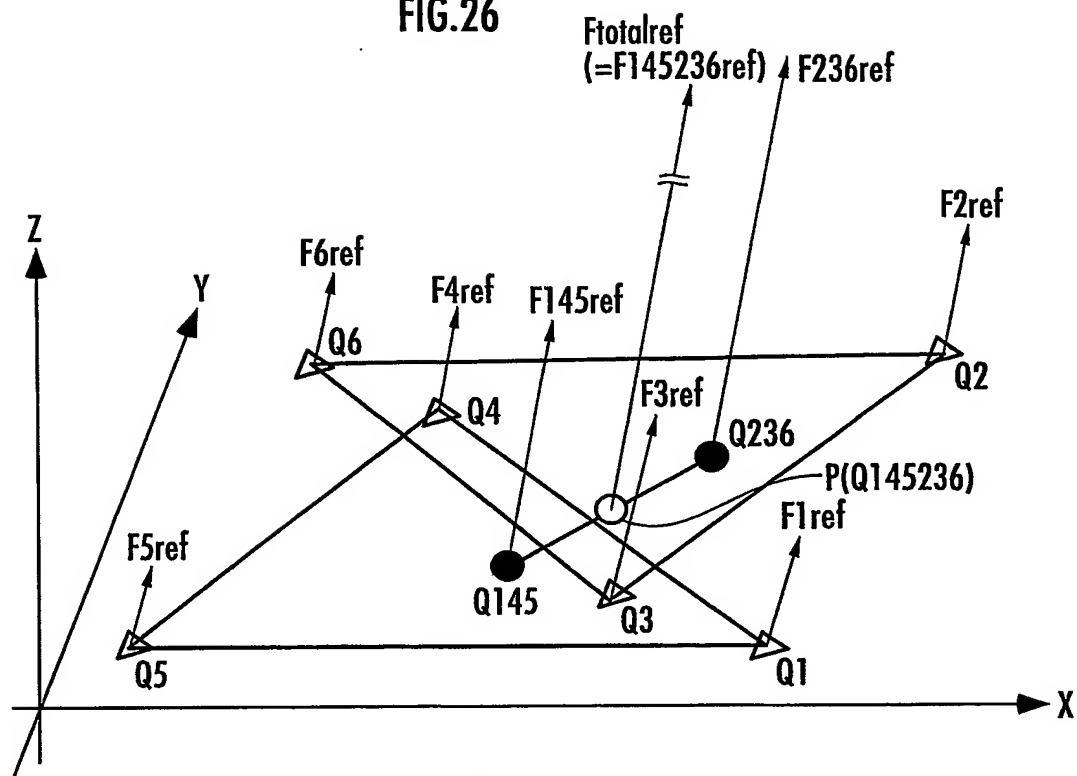


FIG.27

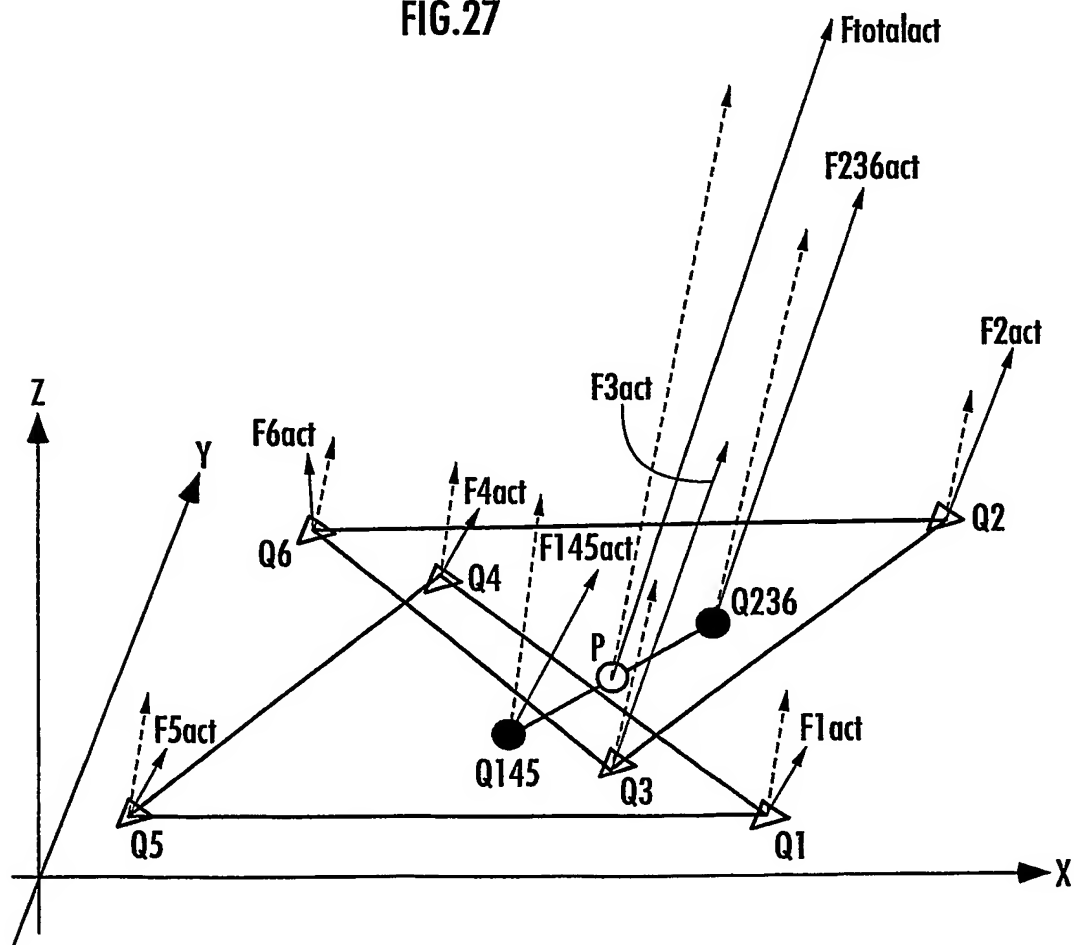
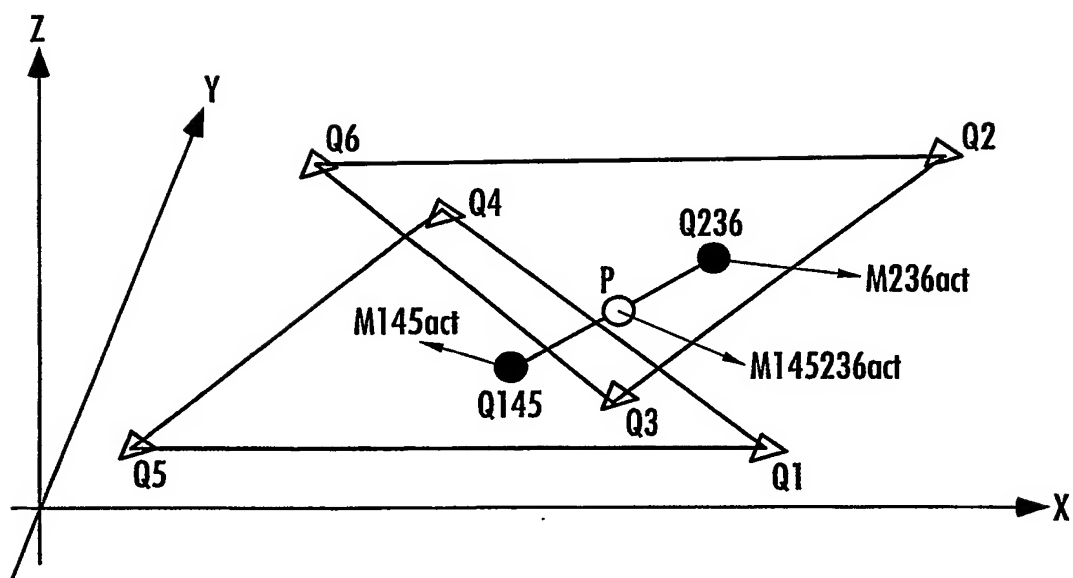


FIG.28



22 / 55

FIG.29(a)

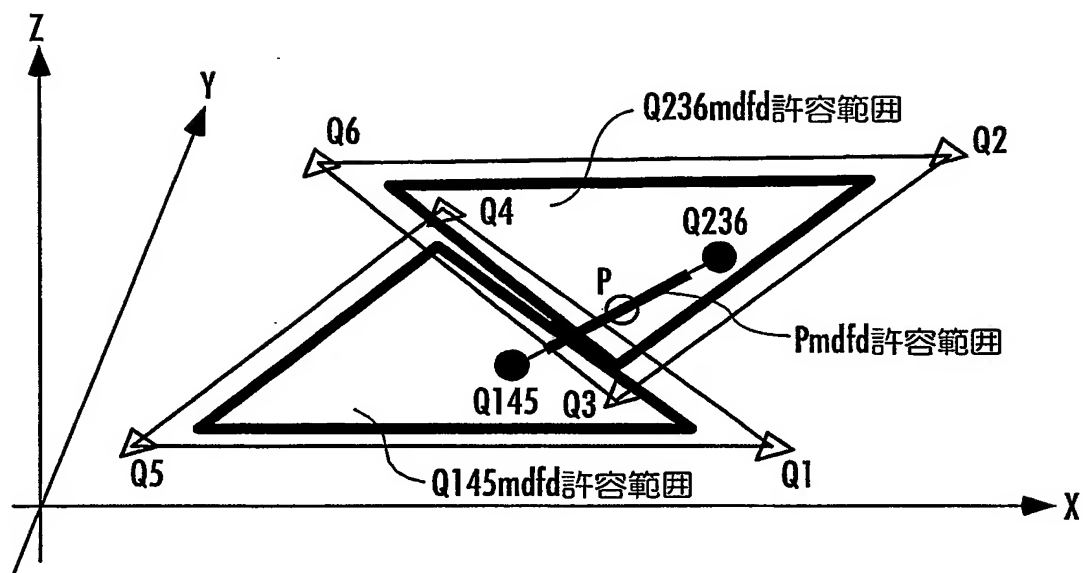
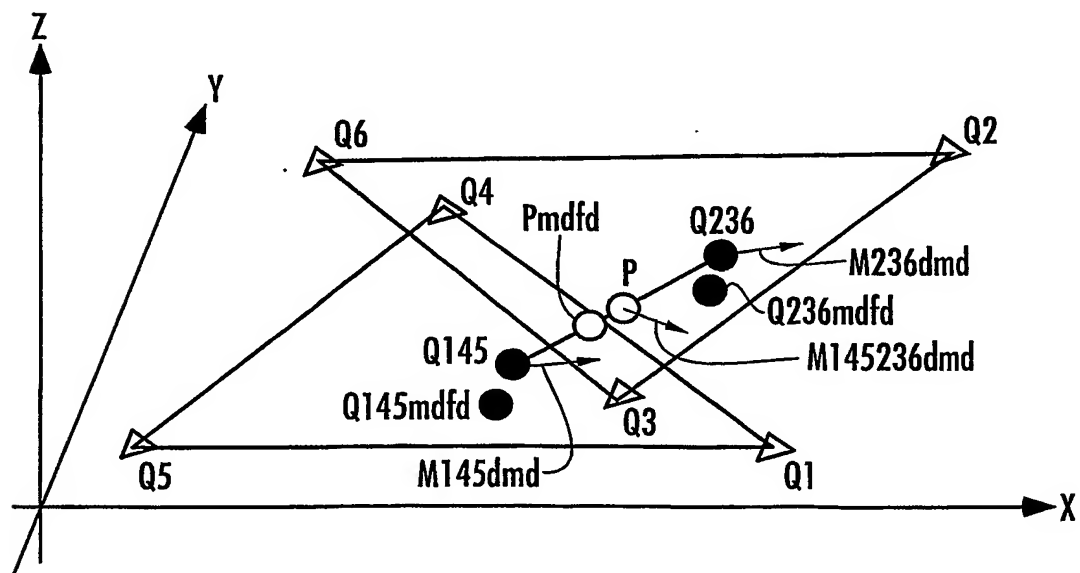


FIG.29(b)



23 / 55

FIG.30

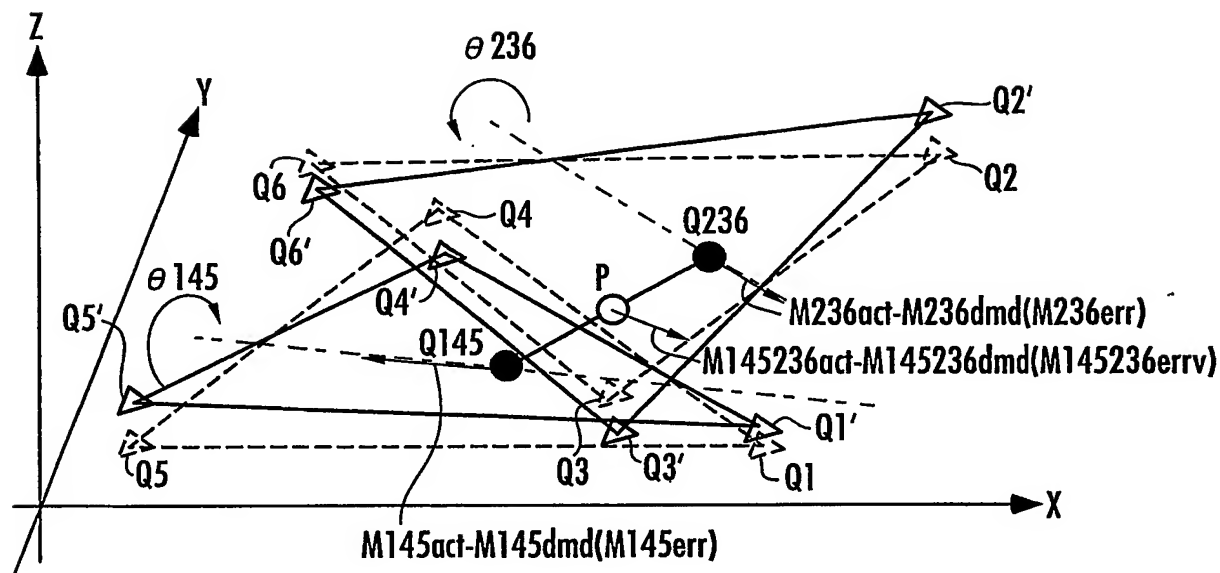
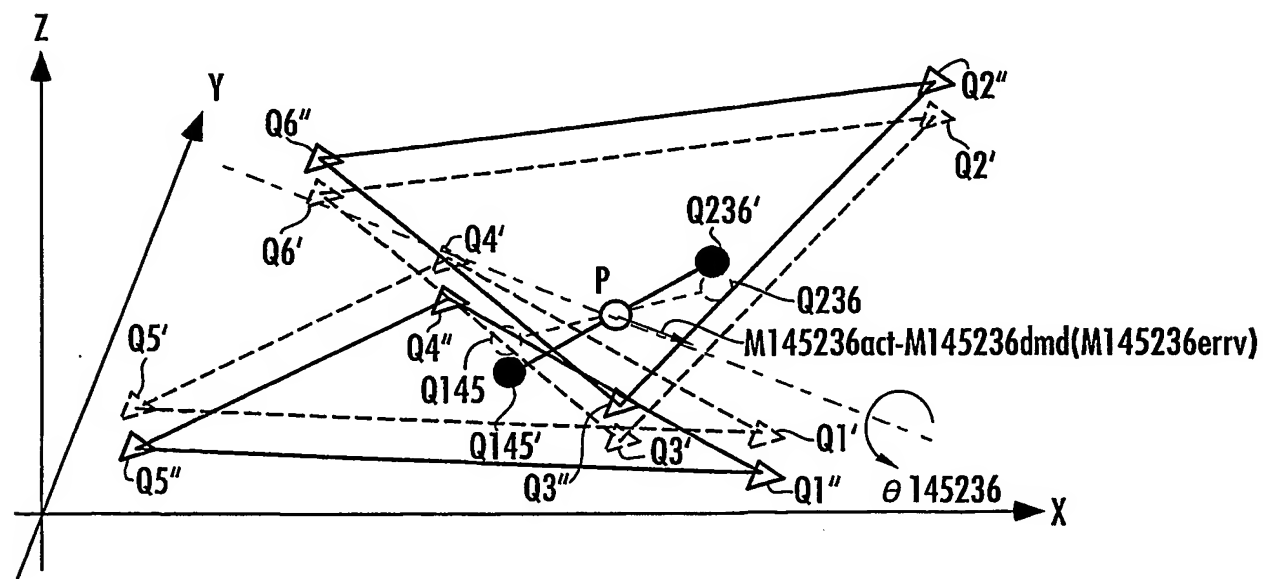
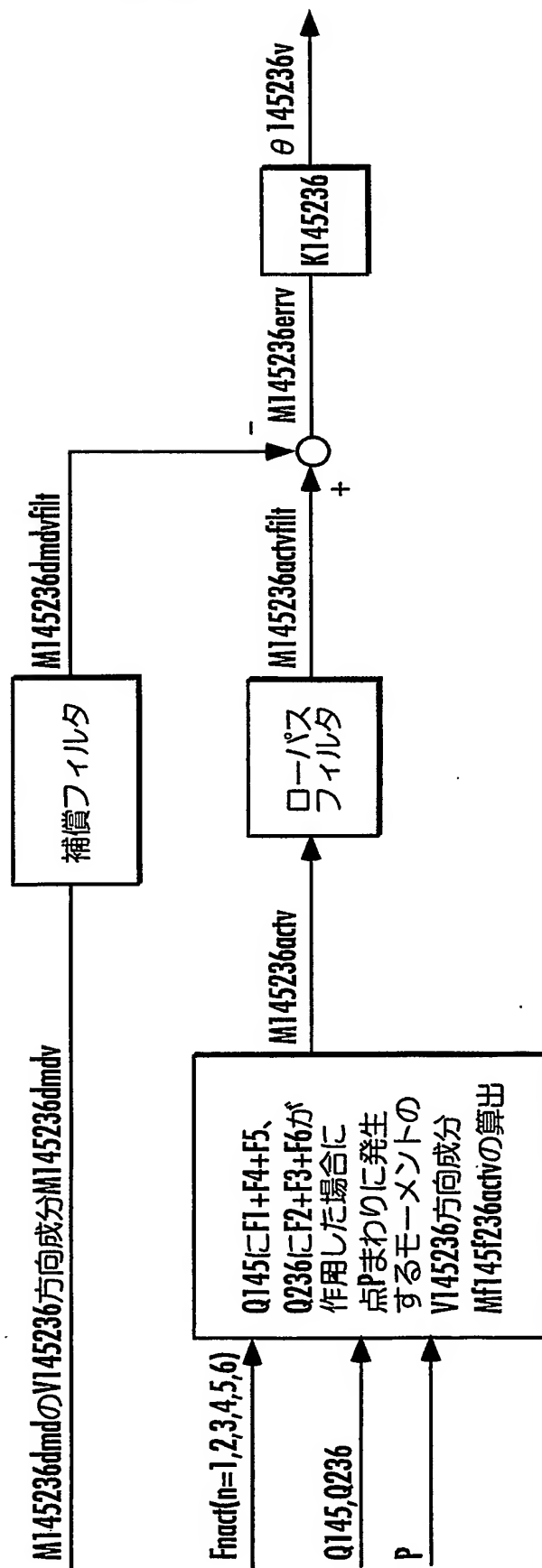


FIG.31



24 / 55

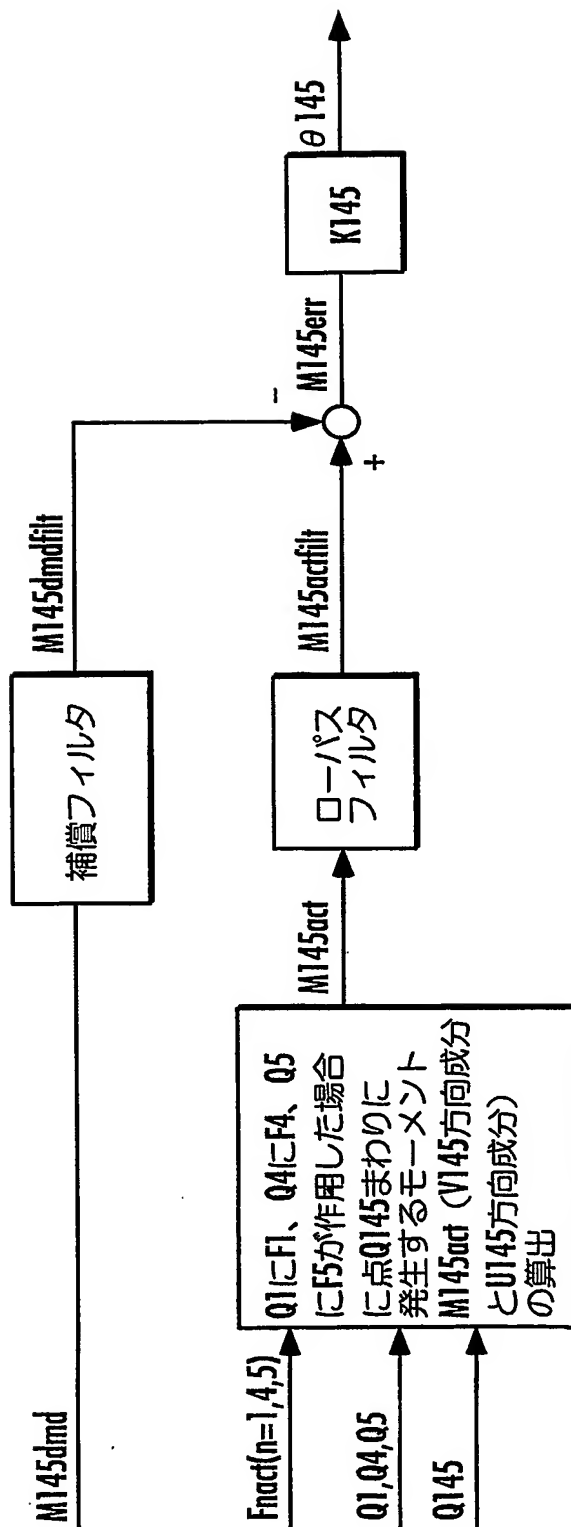
FIG.32





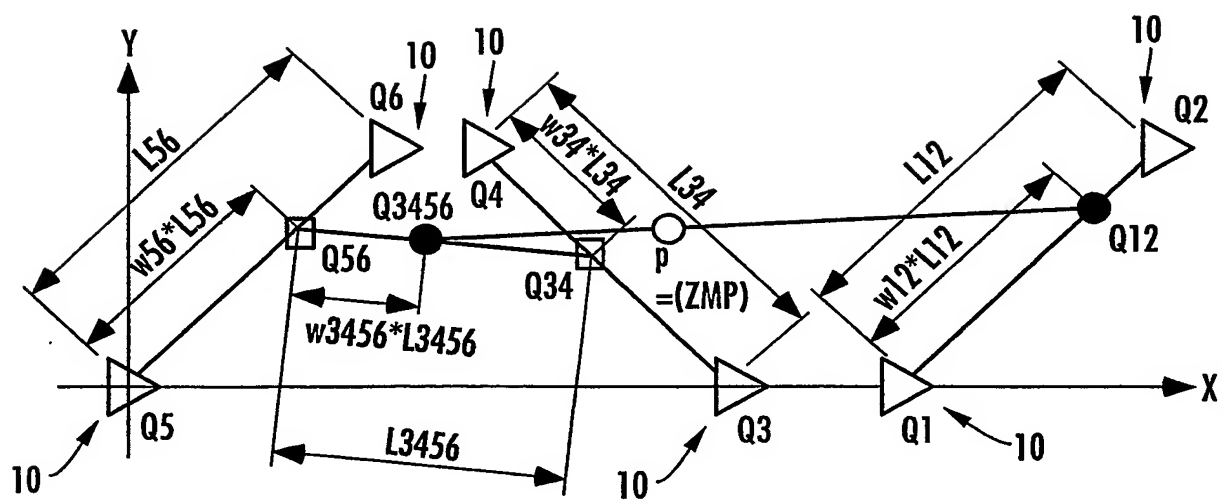
25 / 55

FIG.33



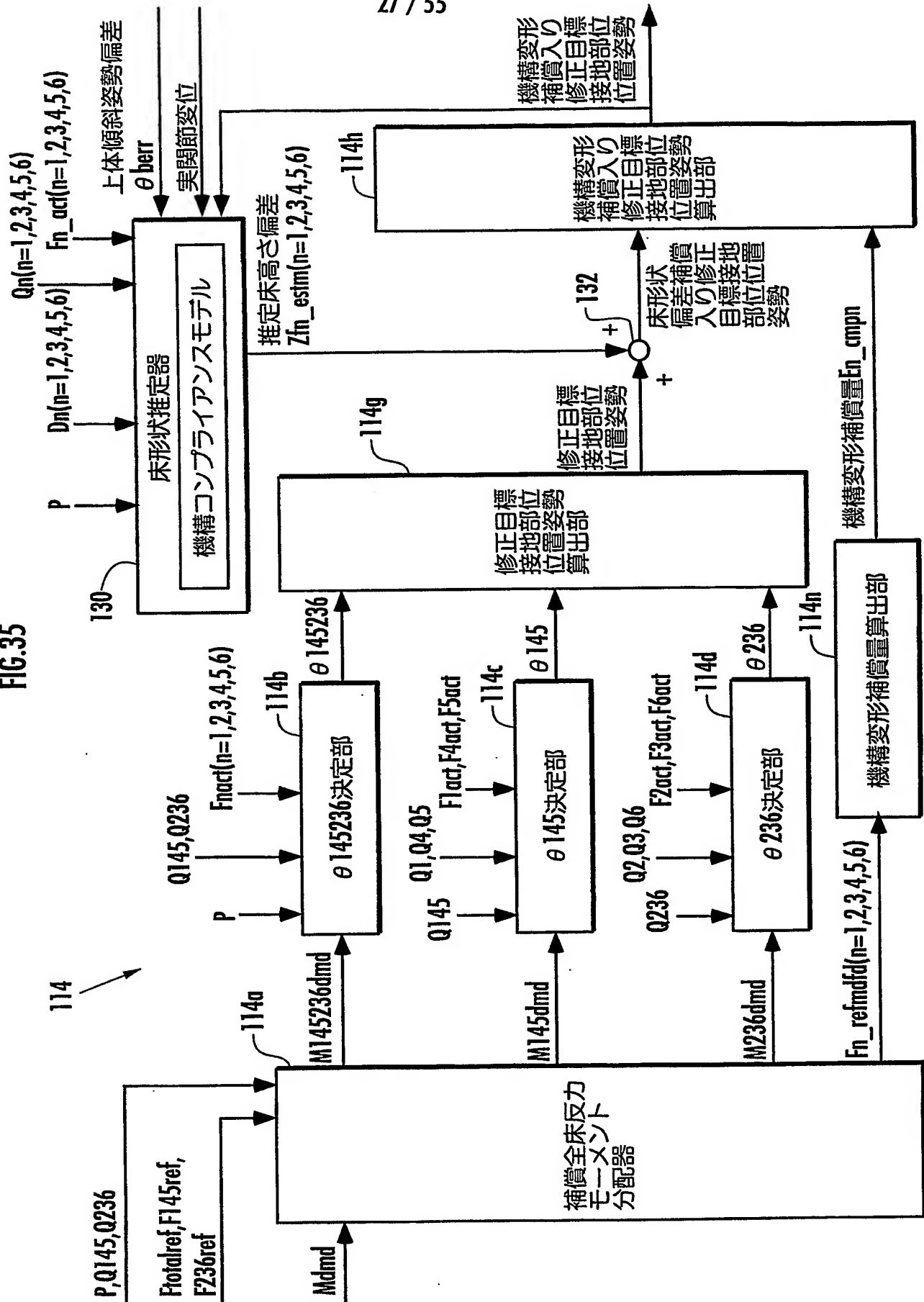
26 / 55

FIG.34



27 / 55

FIG. 35



28 / 55

FIG.36

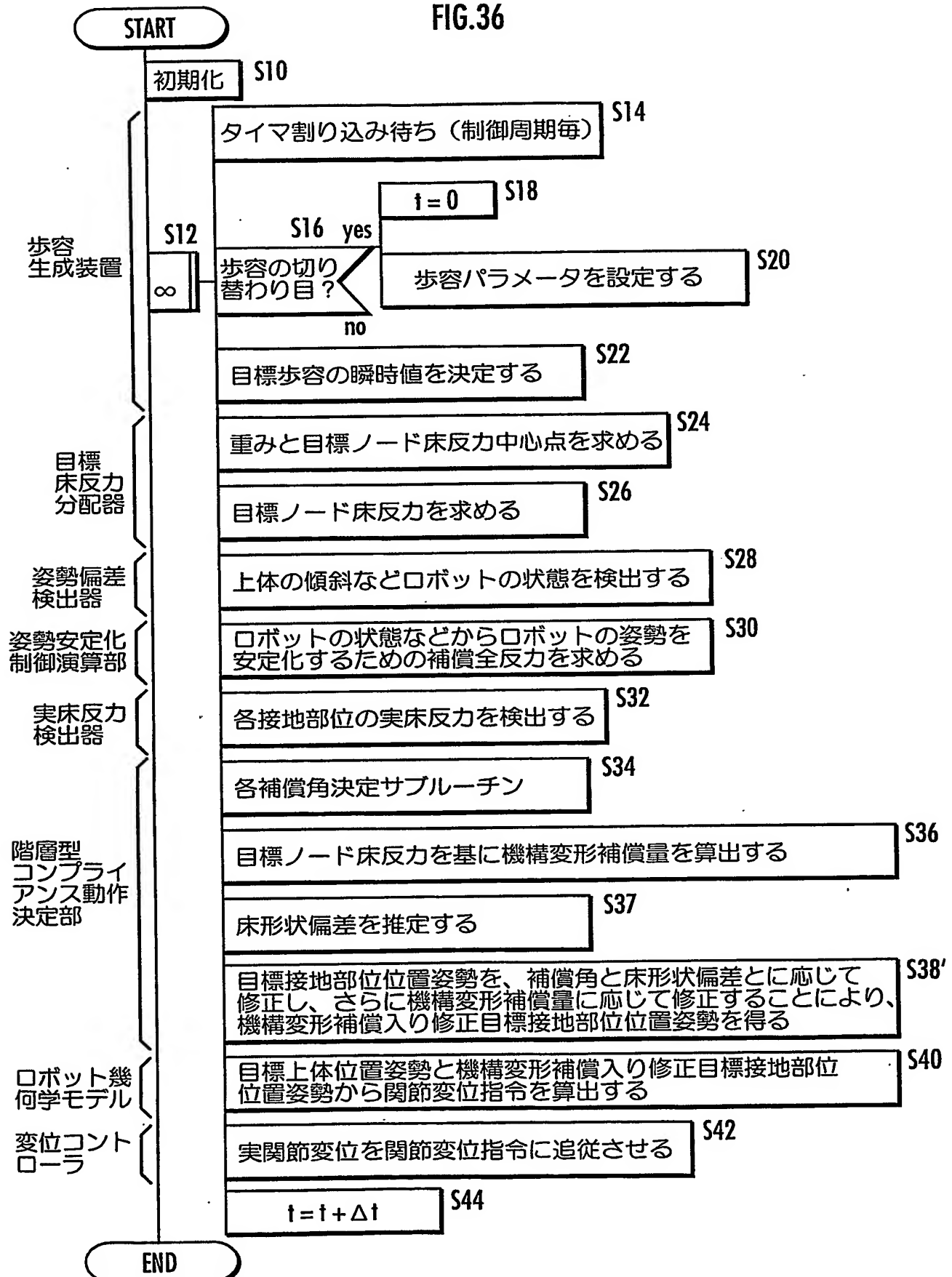


FIG.37

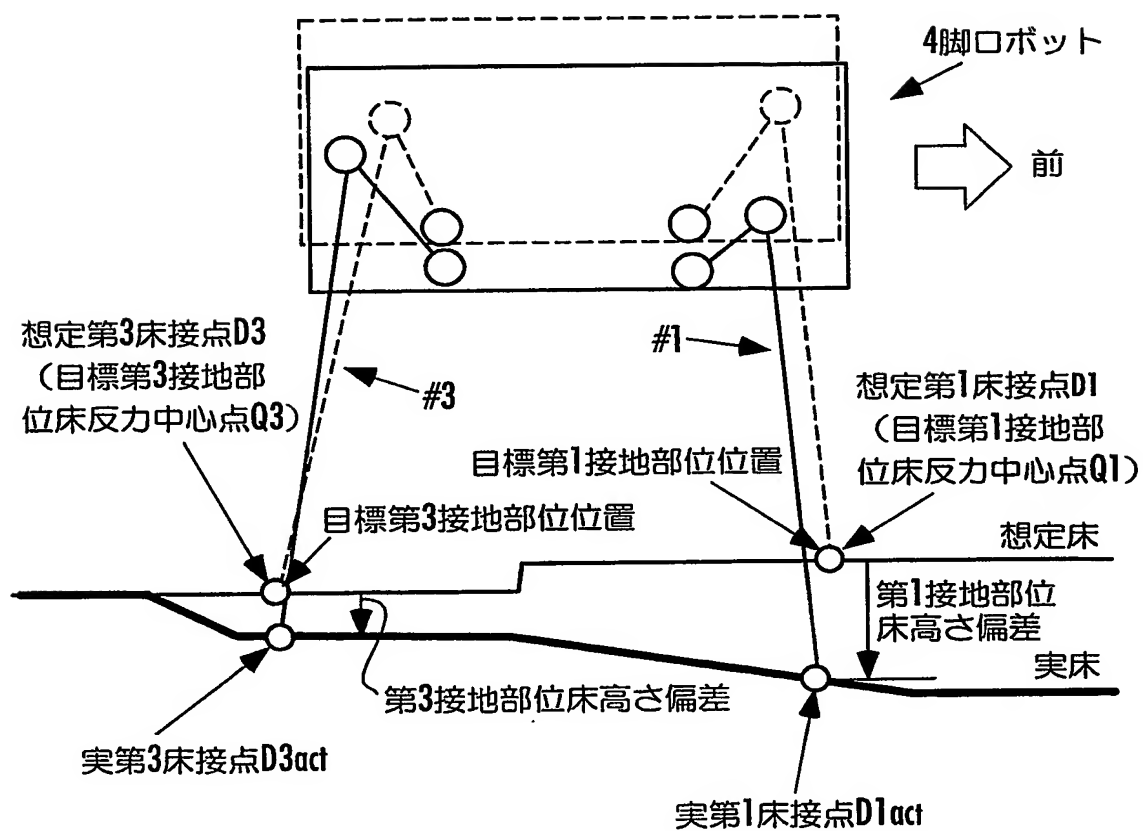
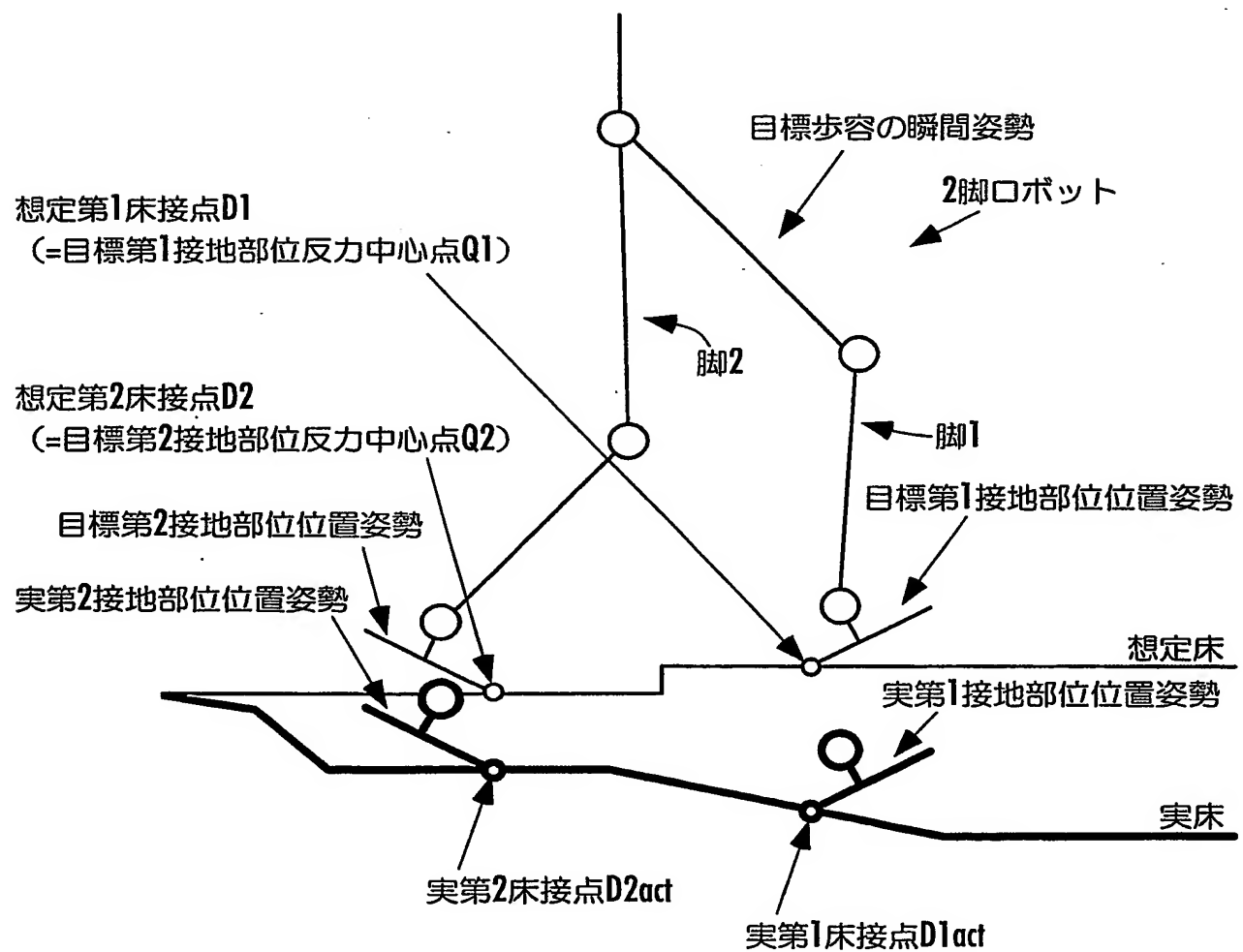
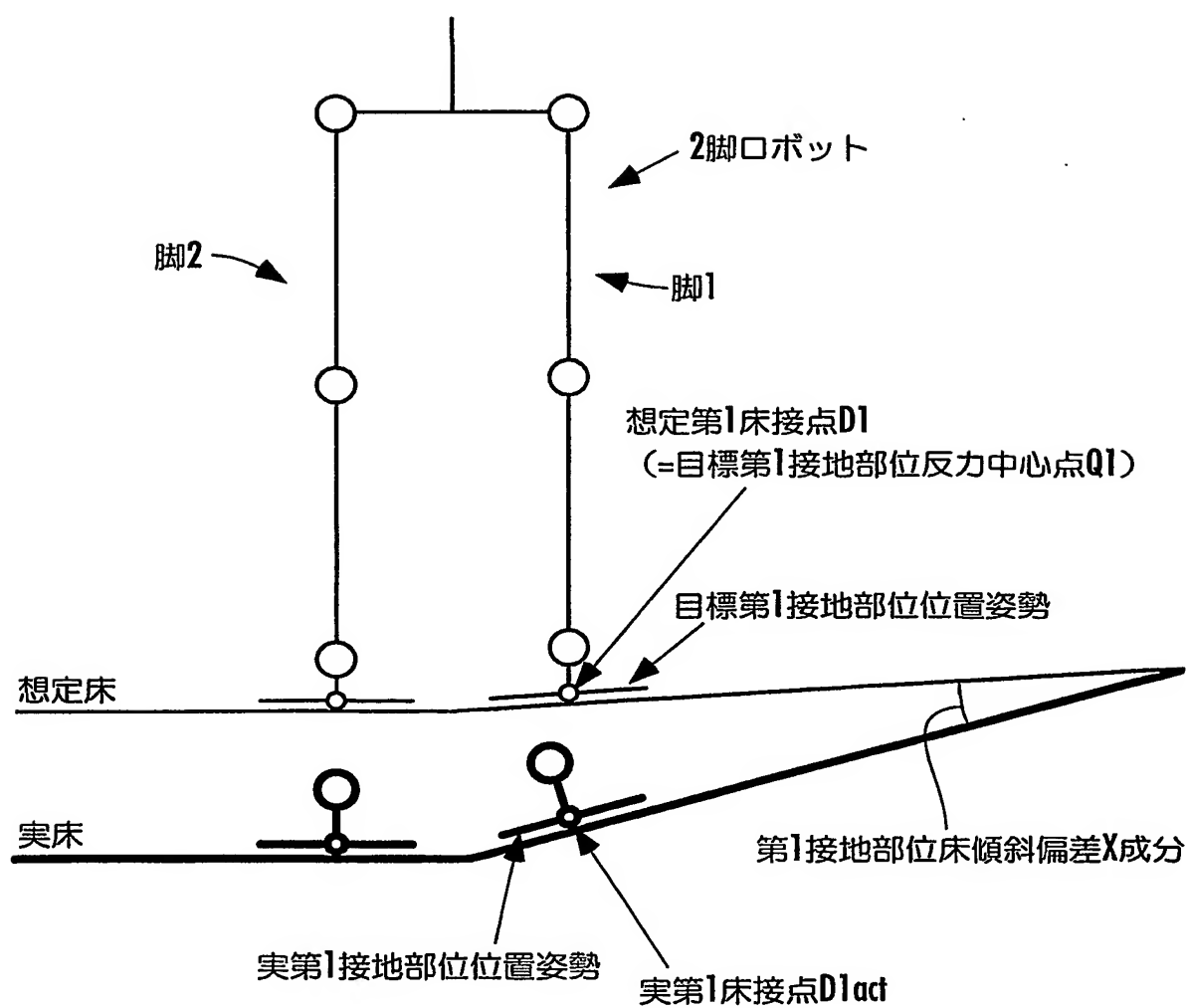


FIG.38



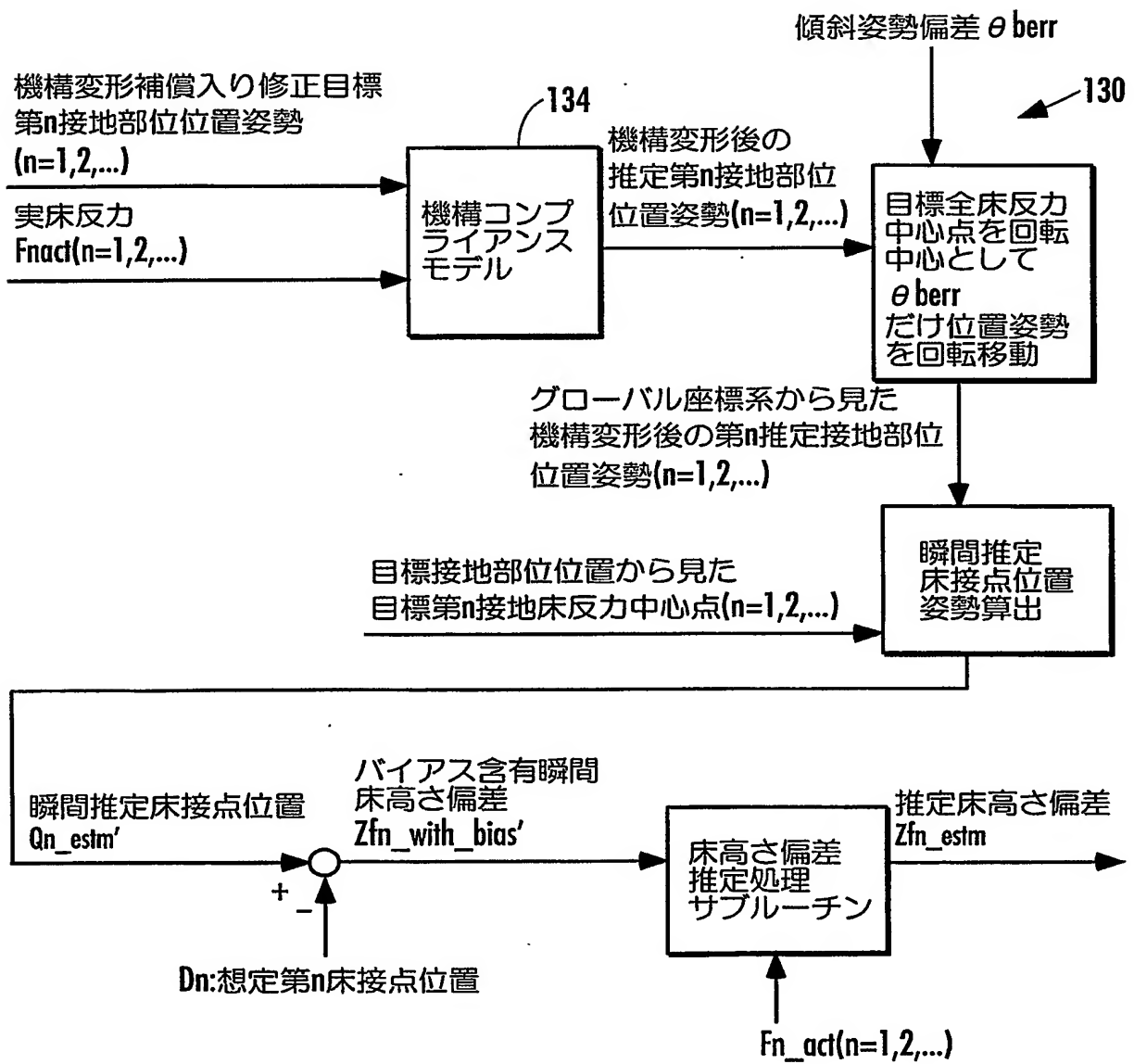
31 / 55

FIG.39



32 / 55

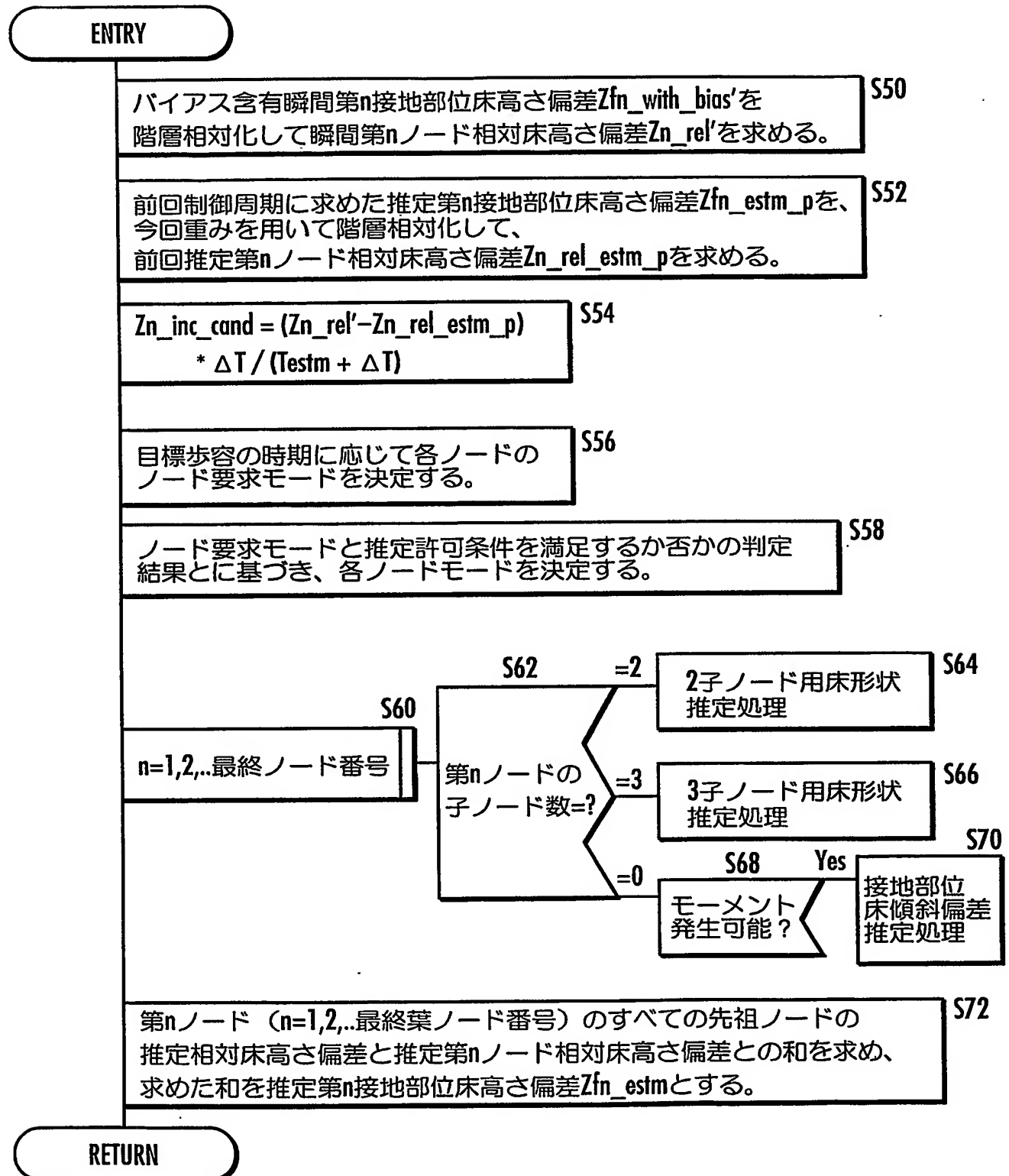
FIG.40





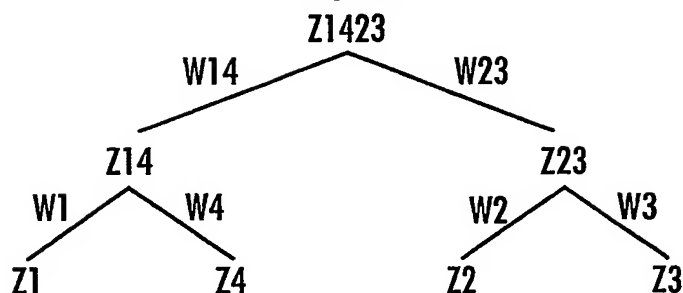
33 / 55

FIG.41



34 / 55

FIG.42



$$Z14\_with\_bias = W1 \cdot Z1\_with\_bias + W4 \cdot Z4\_with\_bias$$

$$Z23\_with\_bias = W2 \cdot Z2\_with\_bias + W3 \cdot Z3\_with\_bias$$

$$Z1423\_with\_bias = W14 \cdot Z14\_with\_bias + W23 \cdot Z23\_with\_bias$$

$$Z1\_rel = Z1\_with\_bias - Z14\_with\_bias$$

$$Z4\_rel = Z4\_with\_bias - Z14\_with\_bias$$

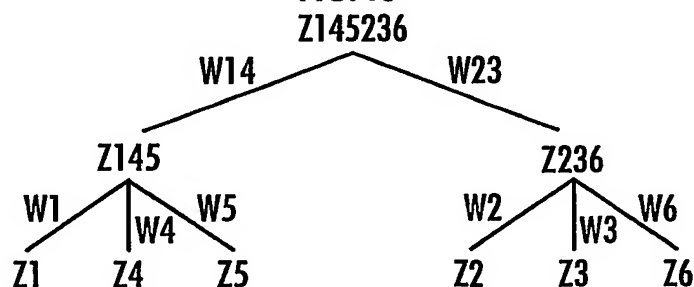
$$Z2\_rel = Z2\_with\_bias - Z23\_with\_bias$$

$$Z3\_rel = Z3\_with\_bias - Z23\_with\_bias$$

$$Z14\_rel = Z14\_with\_bias - Z1423\_with\_bias$$

$$Z23\_rel = Z23\_with\_bias - Z1423\_with\_bias$$

FIG.43



$$Z145\_with\_bias = W1 \cdot Z1\_with\_bias + W4 \cdot Z4\_with\_bias + W5 \cdot Z5\_with\_bias$$

$$Z236\_with\_bias = W2 \cdot Z2\_with\_bias + W3 \cdot Z3\_with\_bias + W6 \cdot Z6\_with\_bias$$

$$Z145236\_with\_bias = W145 \cdot Z145\_with\_bias + W236 \cdot Z236\_with\_bias$$

$$Z1\_rel = Z1\_with\_bias - Z145\_with\_bias$$

$$Z4\_rel = Z4\_with\_bias - Z145\_with\_bias$$

$$Z5\_rel = Z5\_with\_bias - Z145\_with\_bias$$

$$Z2\_rel = Z2\_with\_bias - Z236\_with\_bias$$

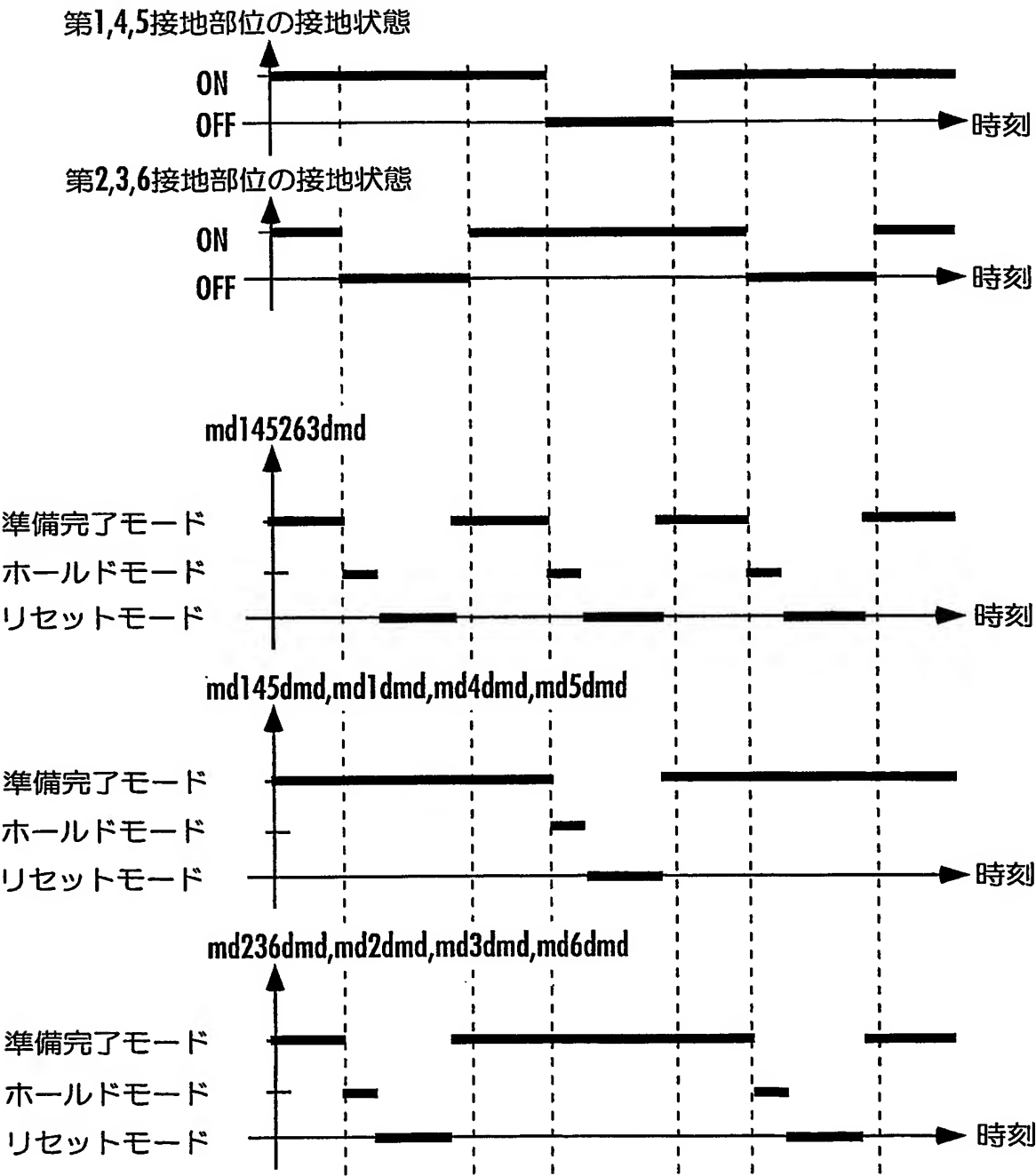
$$Z3\_rel = Z3\_with\_bias - Z236\_with\_bias$$

$$Z6\_rel = Z6\_with\_bias - Z236\_with\_bias$$

$$Z145\_rel = Z145\_with\_bias - Z145236\_with\_bias$$

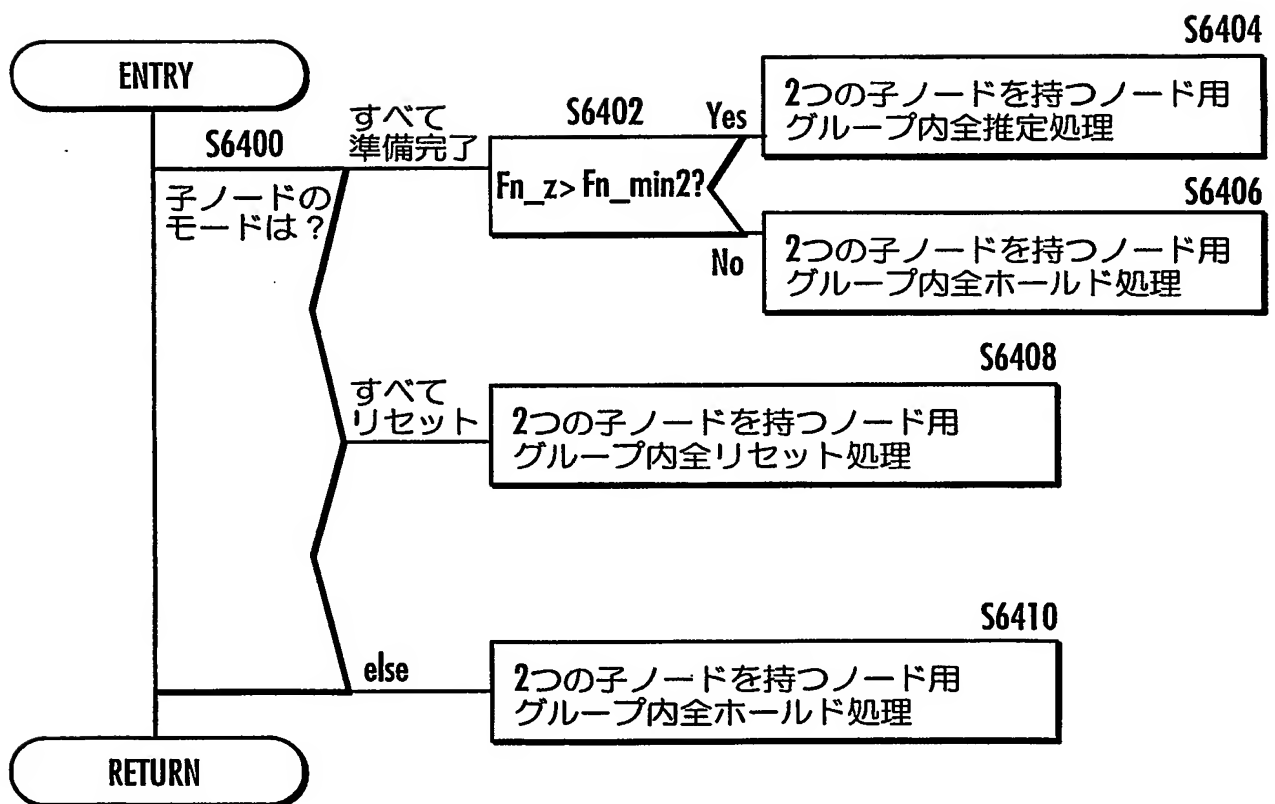
$$Z236\_rel = Z236\_with\_bias - Z145236\_with\_bias$$

FIG.44



36 / 55

FIG.45



37 / 55

FIG.46

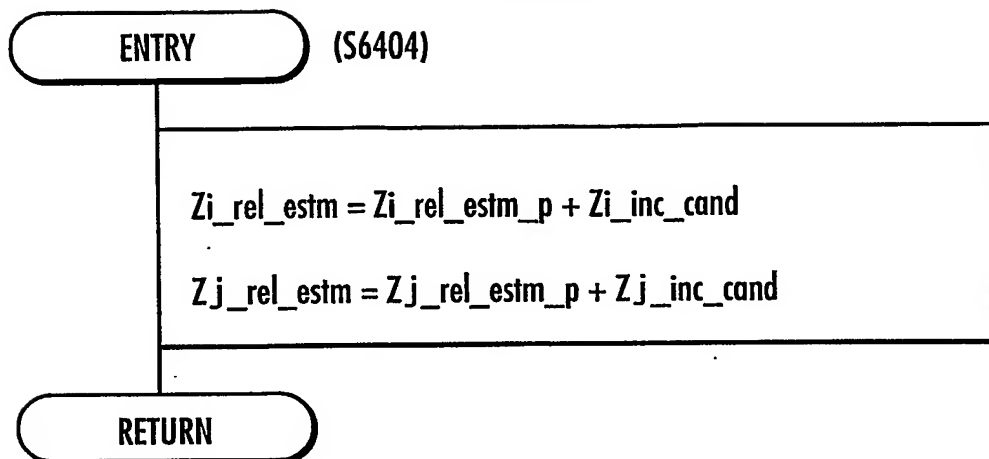


FIG.47

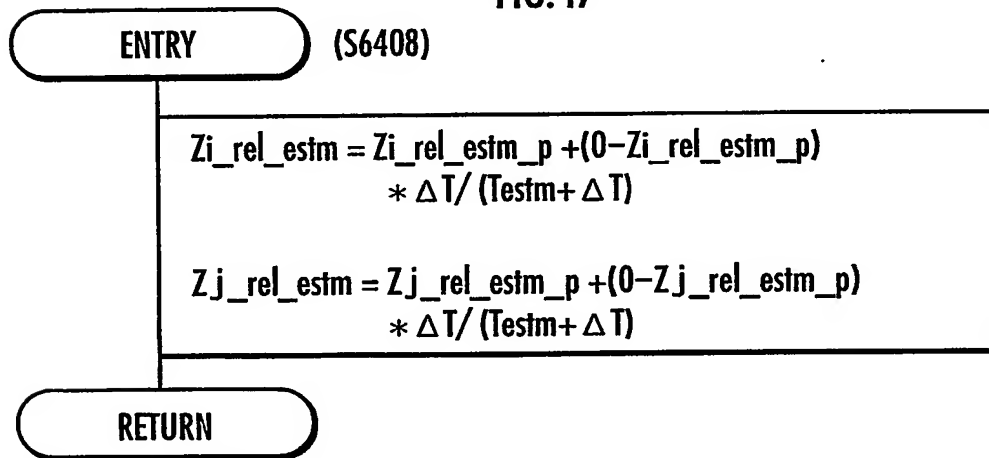
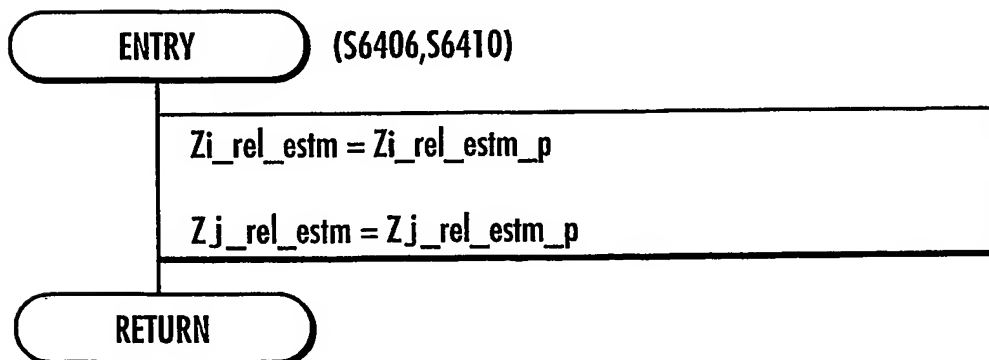


FIG.48



38 / 55

FIG.49

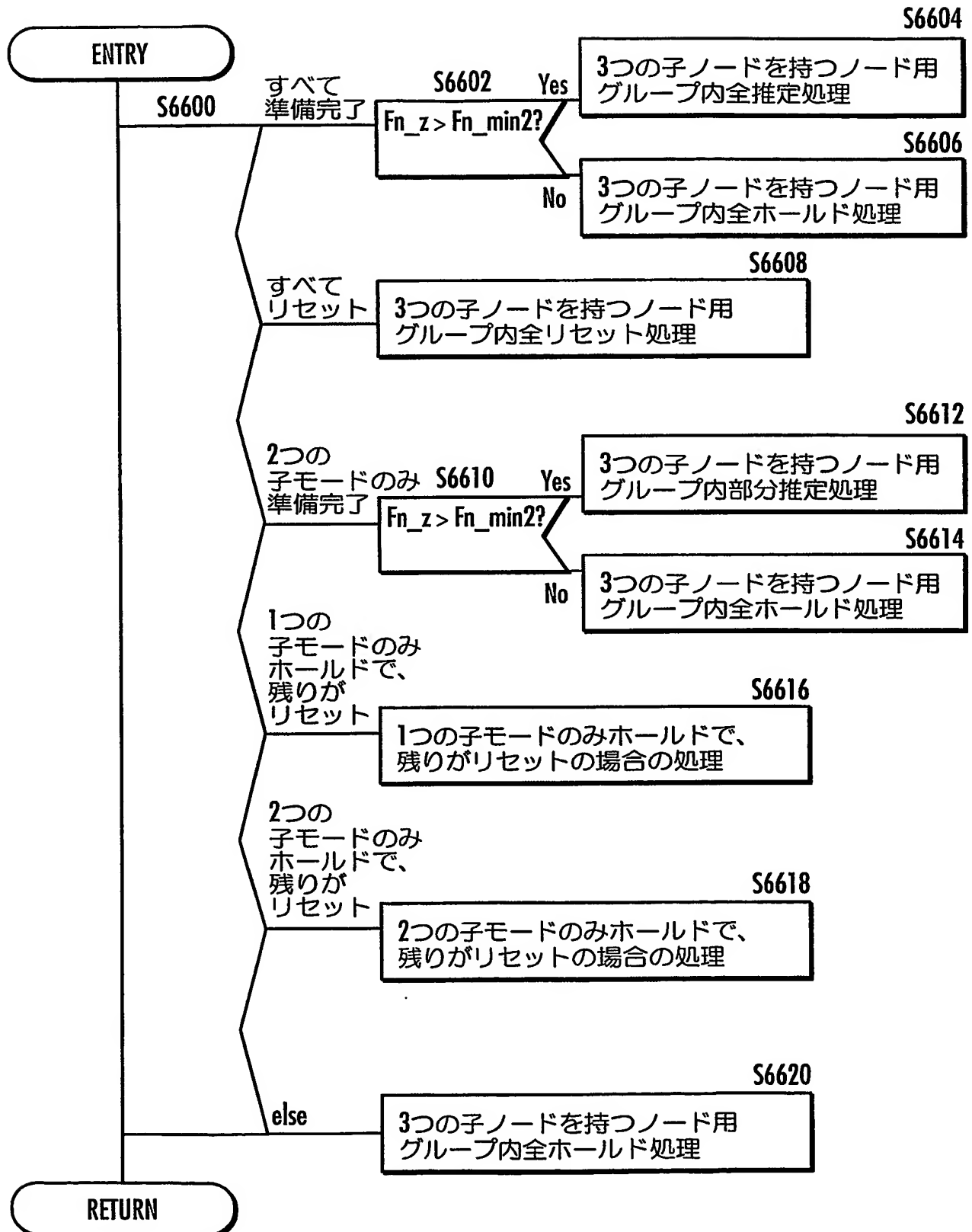
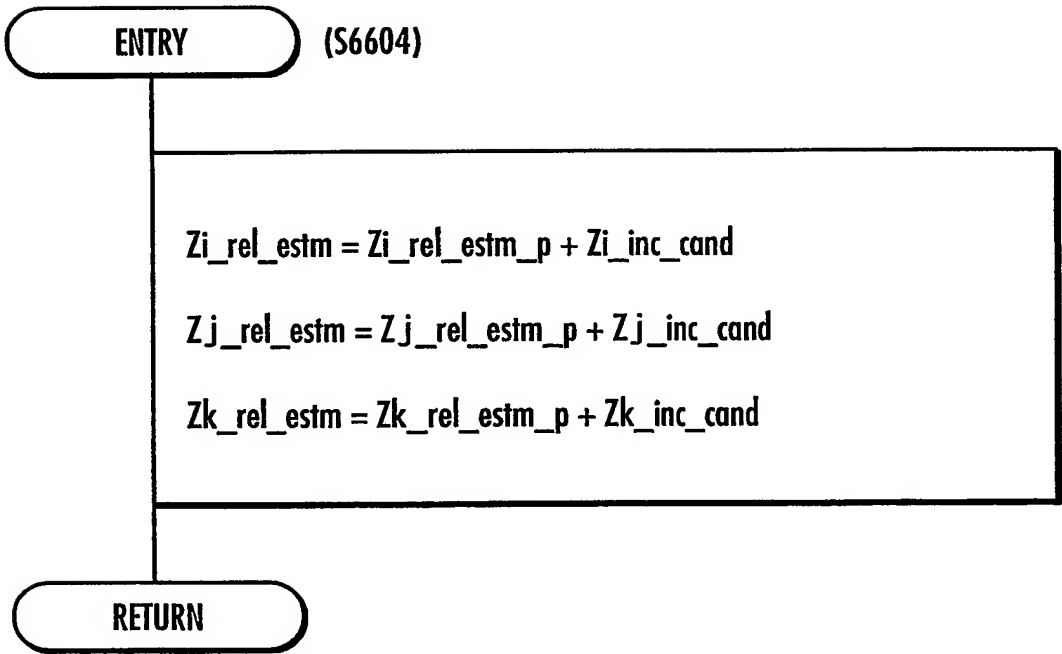


FIG.50



40 / 55

FIG.51

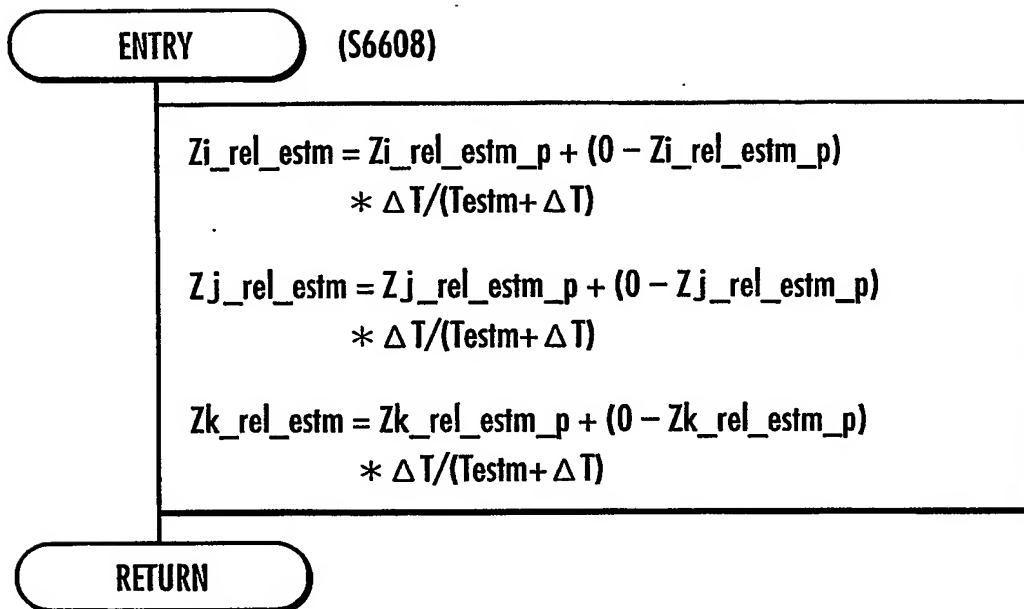
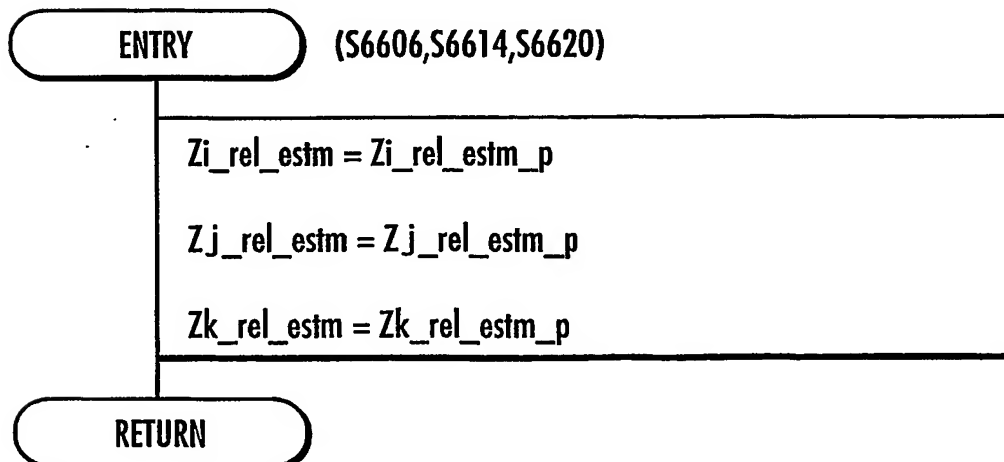


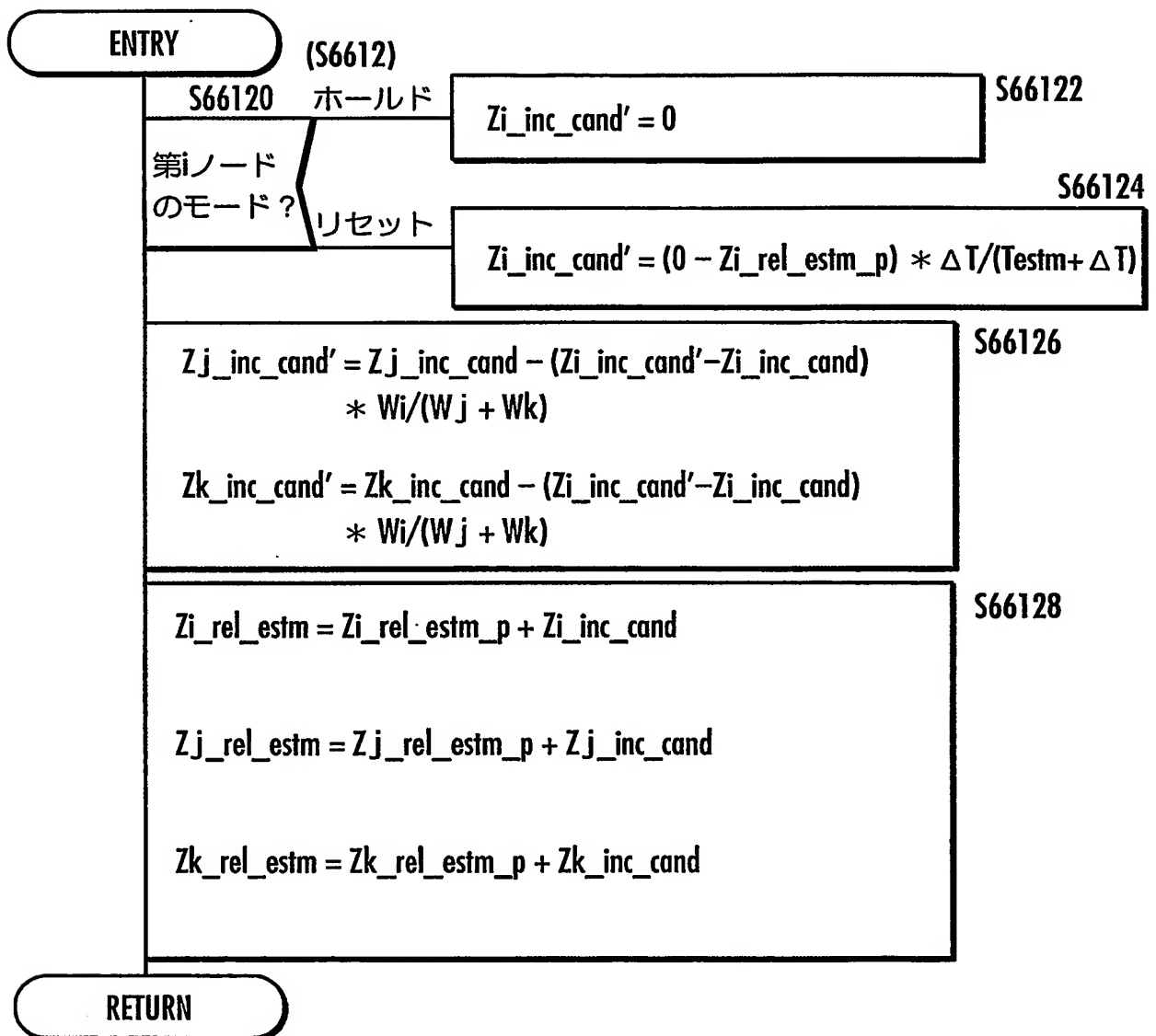
FIG.52





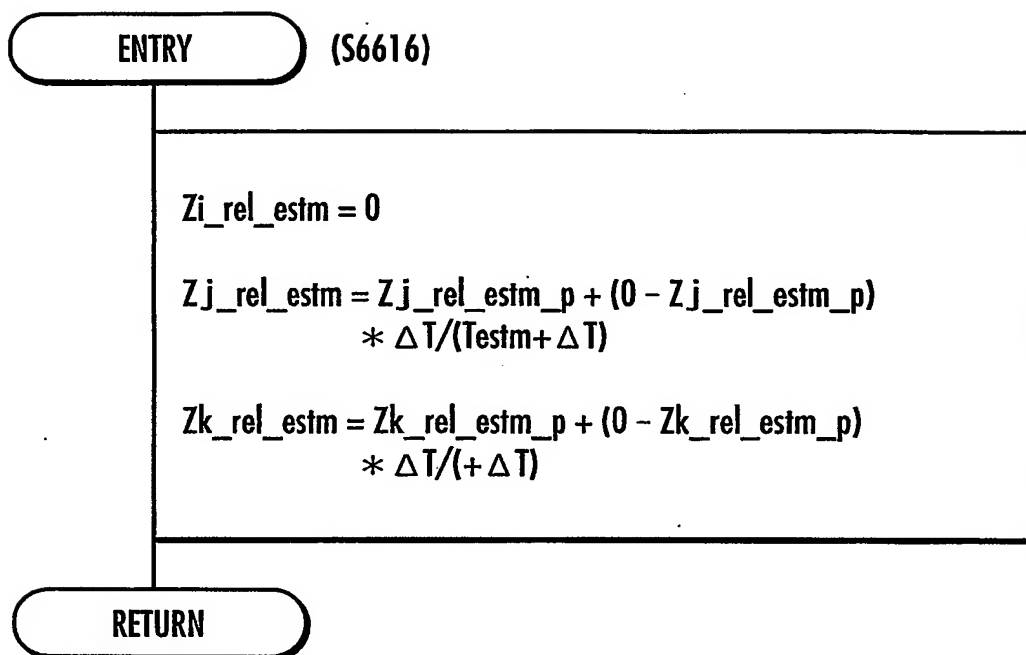
41 / 55

FIG.53



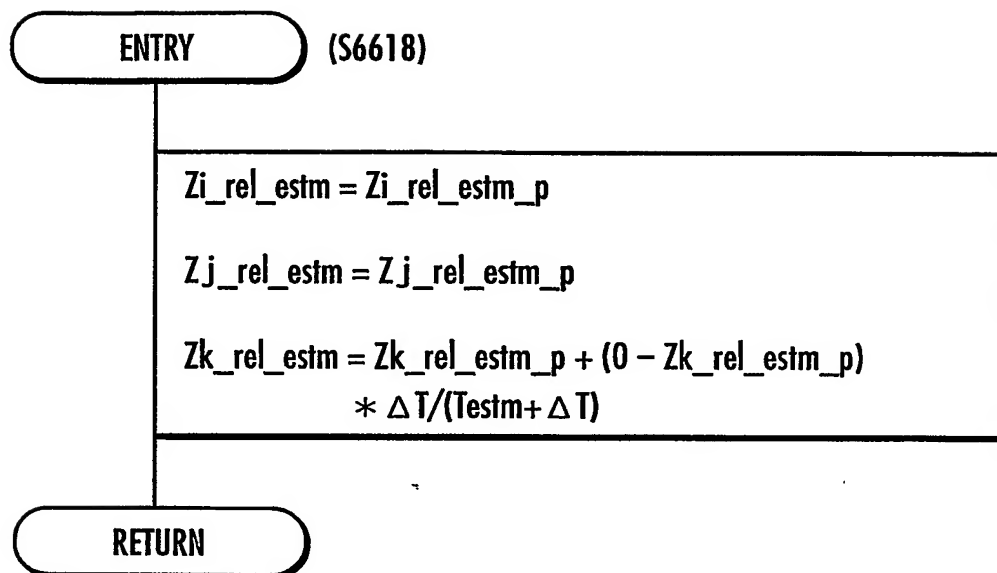
42 / 55

FIG.54



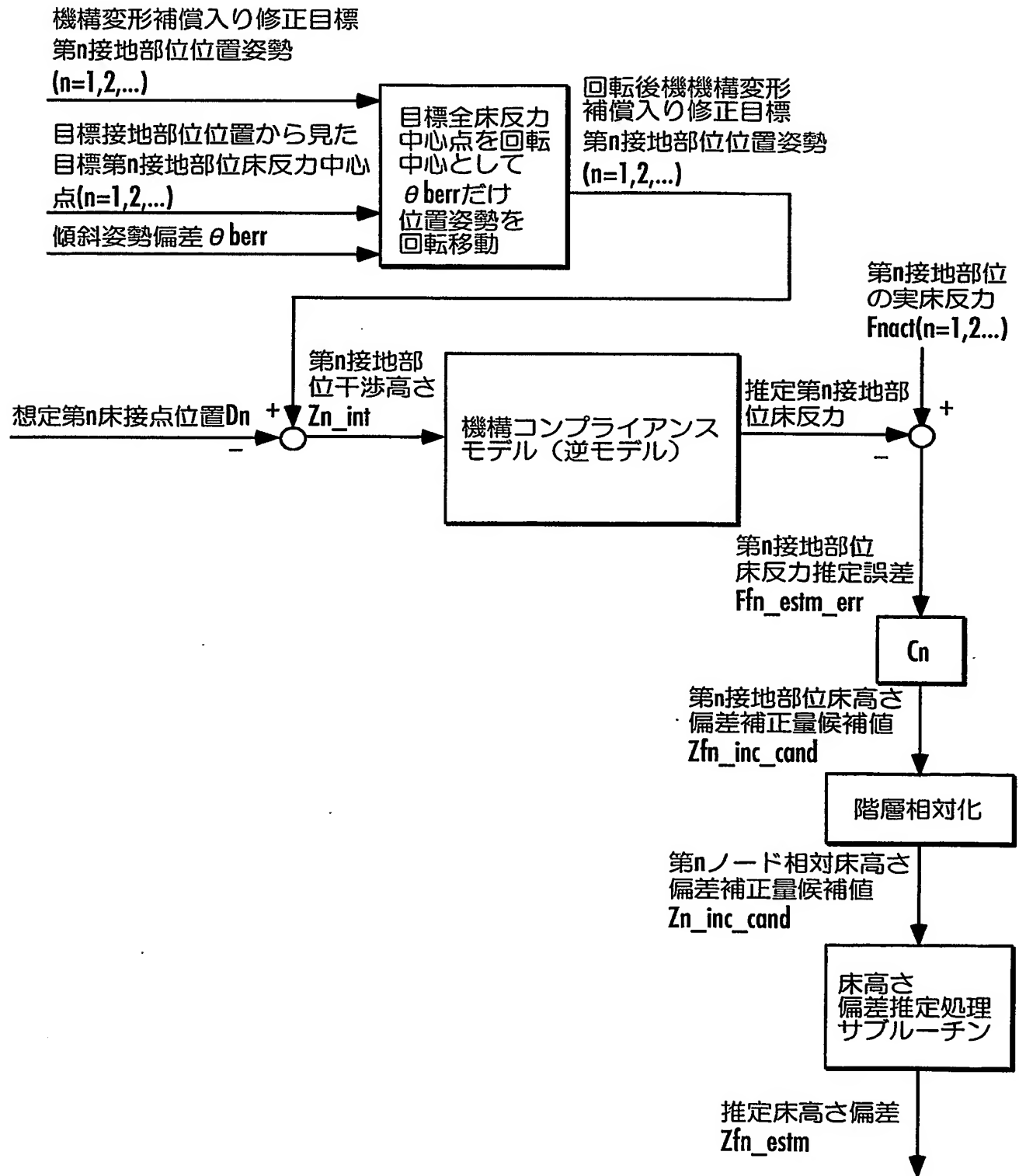
43 / 55

FIG.55



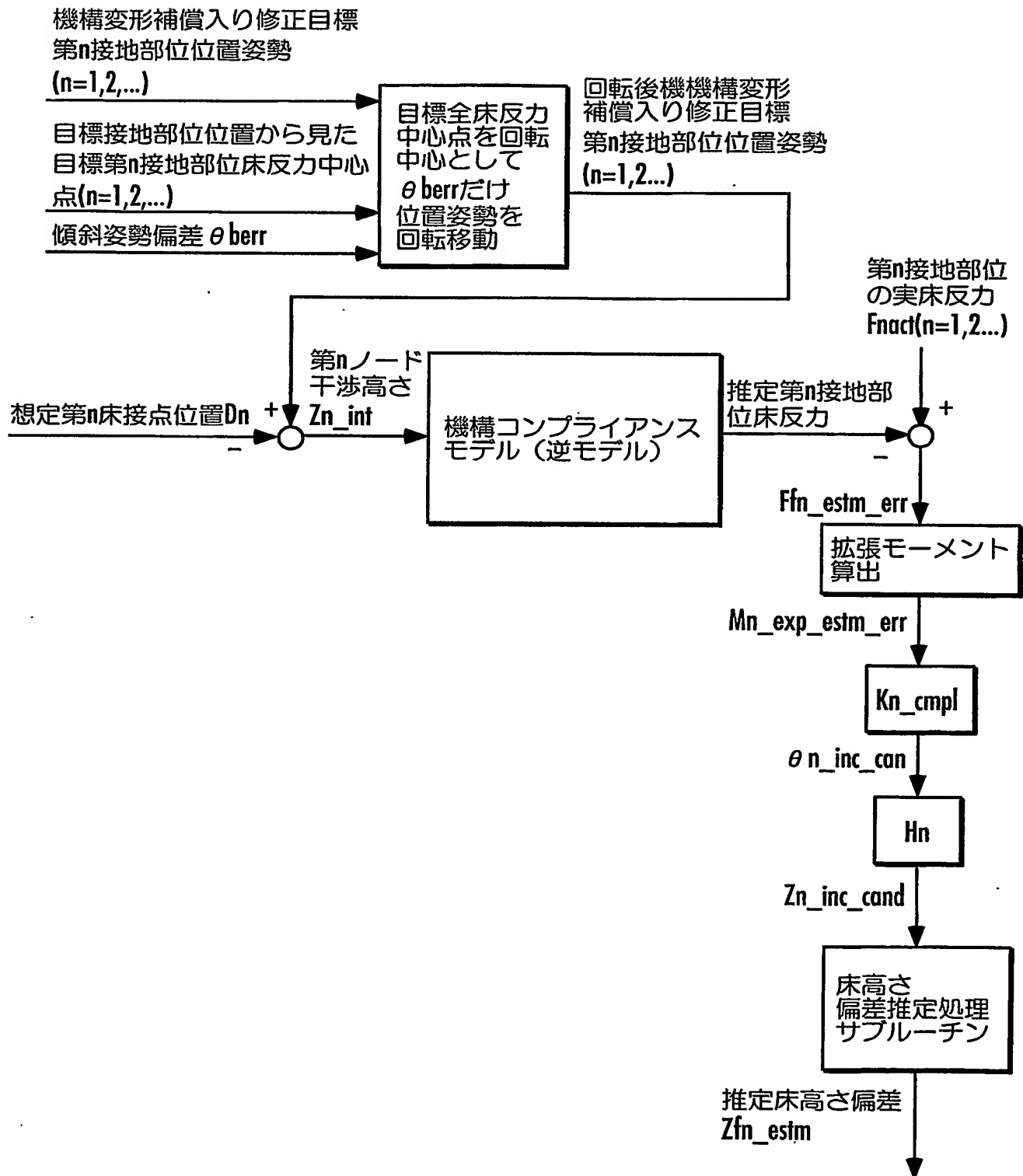
44 / 55

FIG.56



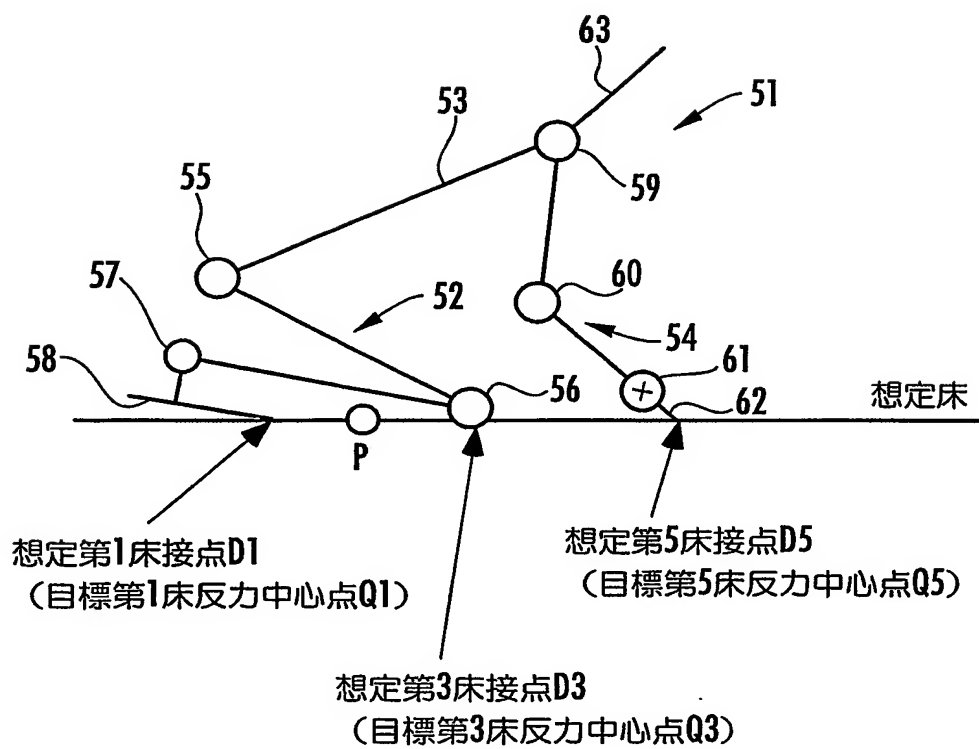
45 / 55

FIG.57



46 / 55

FIG.58



47 / 55

FIG.59

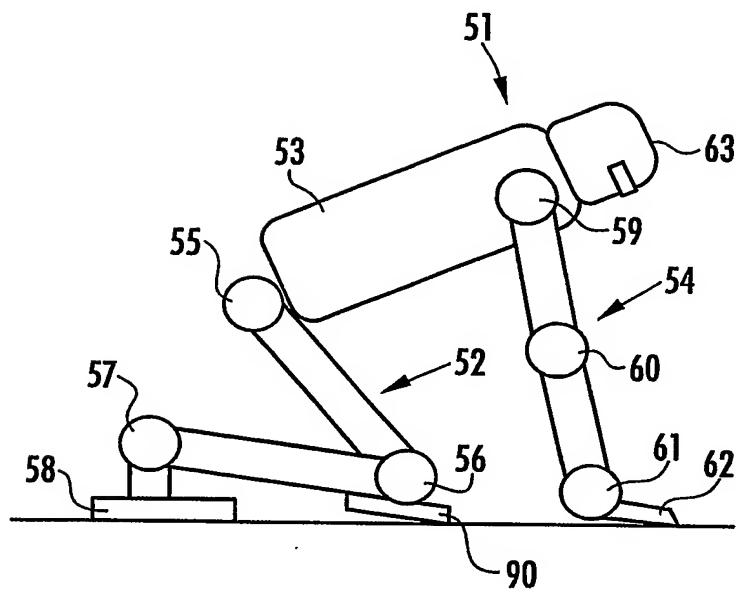
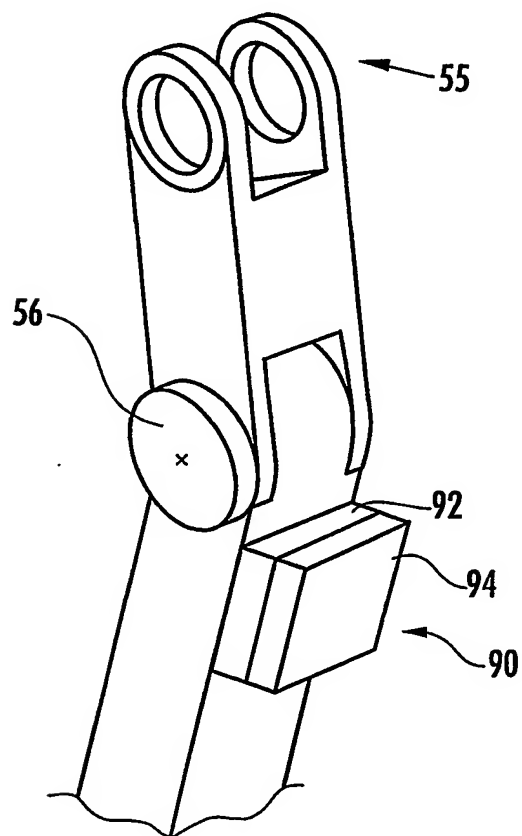


FIG.60



48 / 55

FIG.61

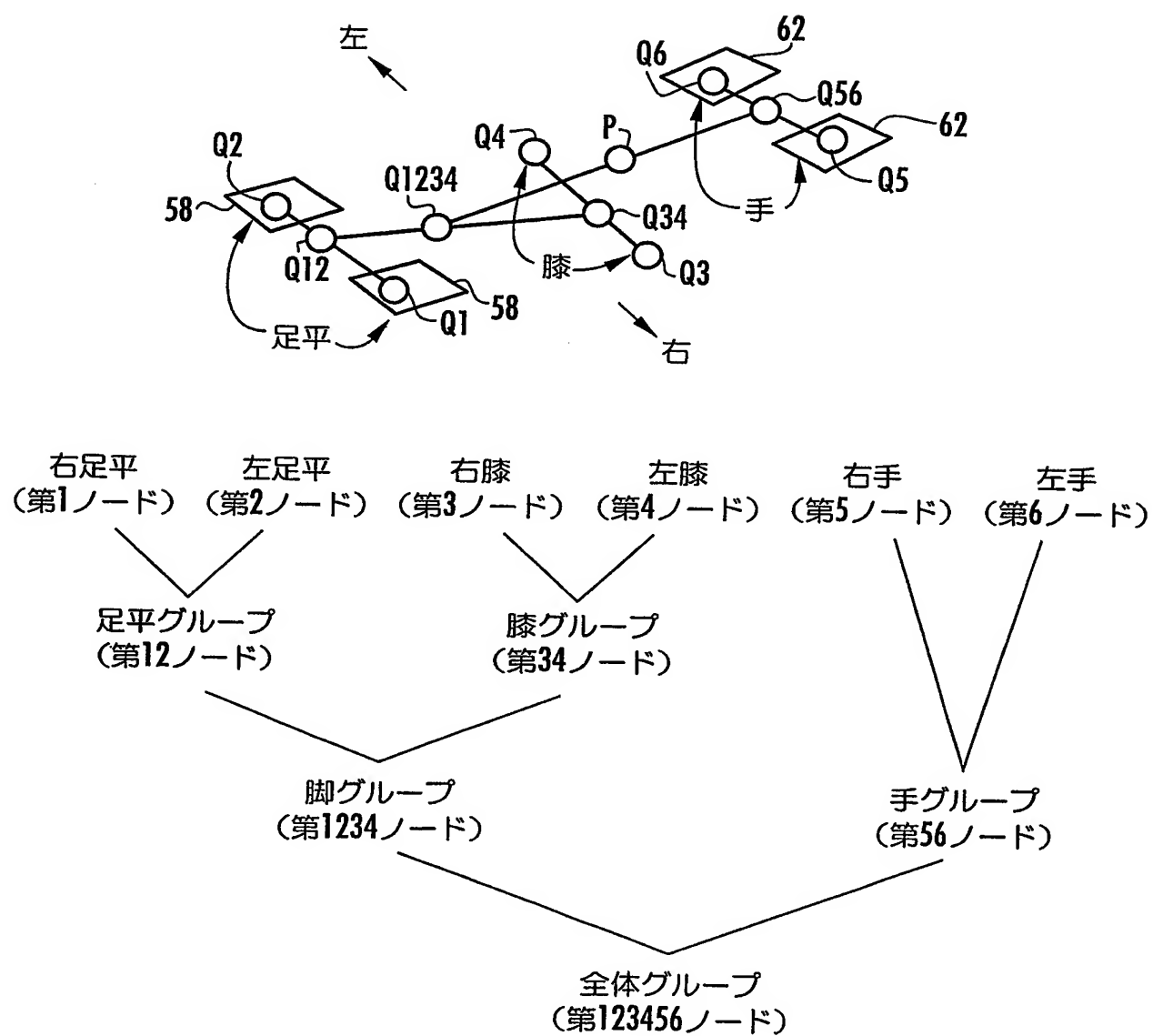






FIG.63(a)

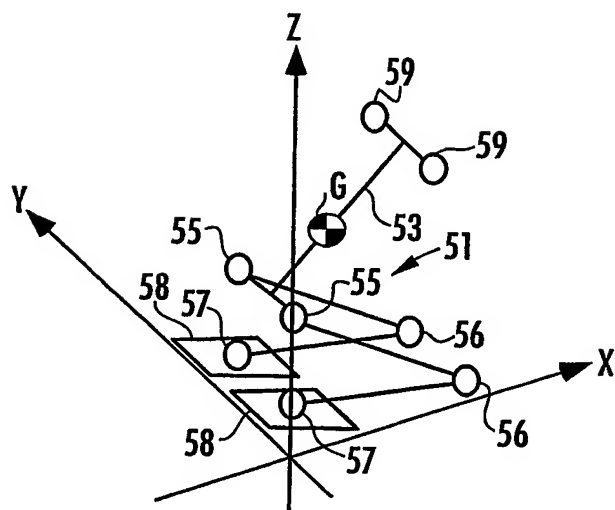


FIG.63(b)

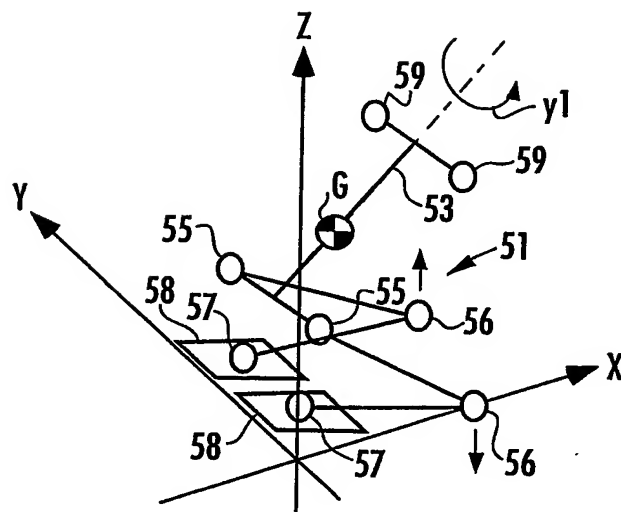


FIG.63(c)

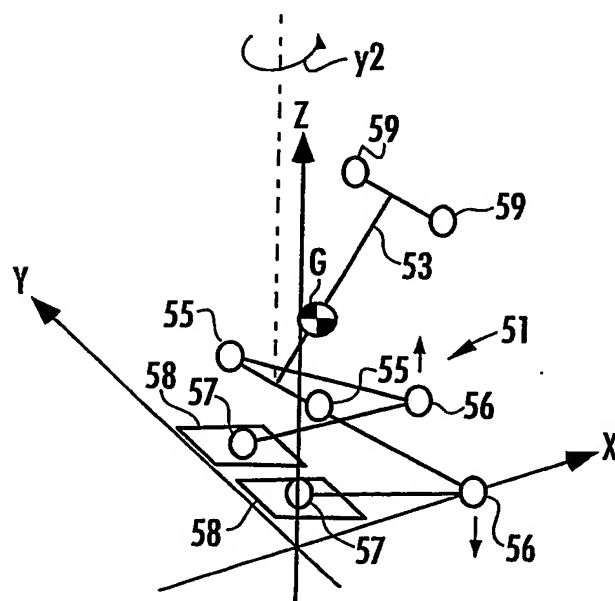
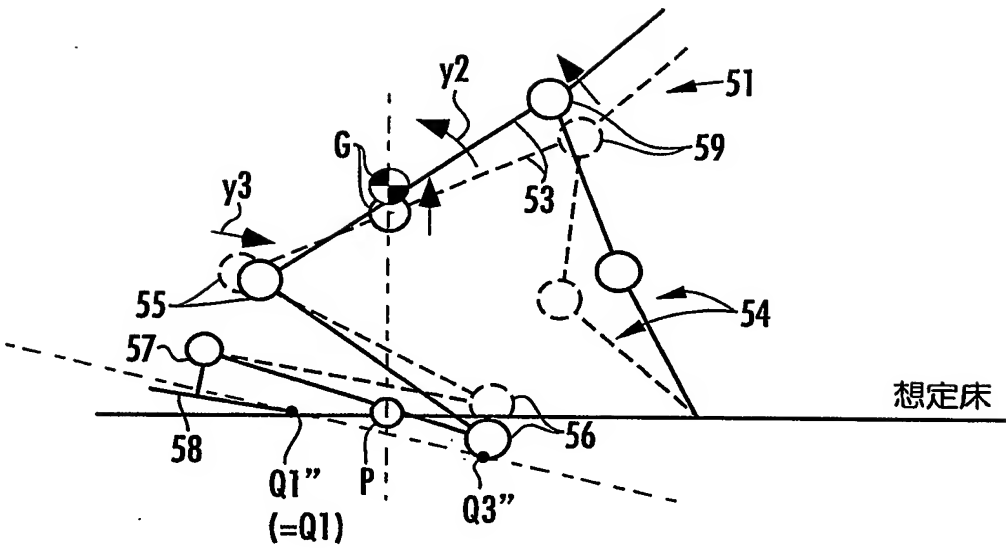
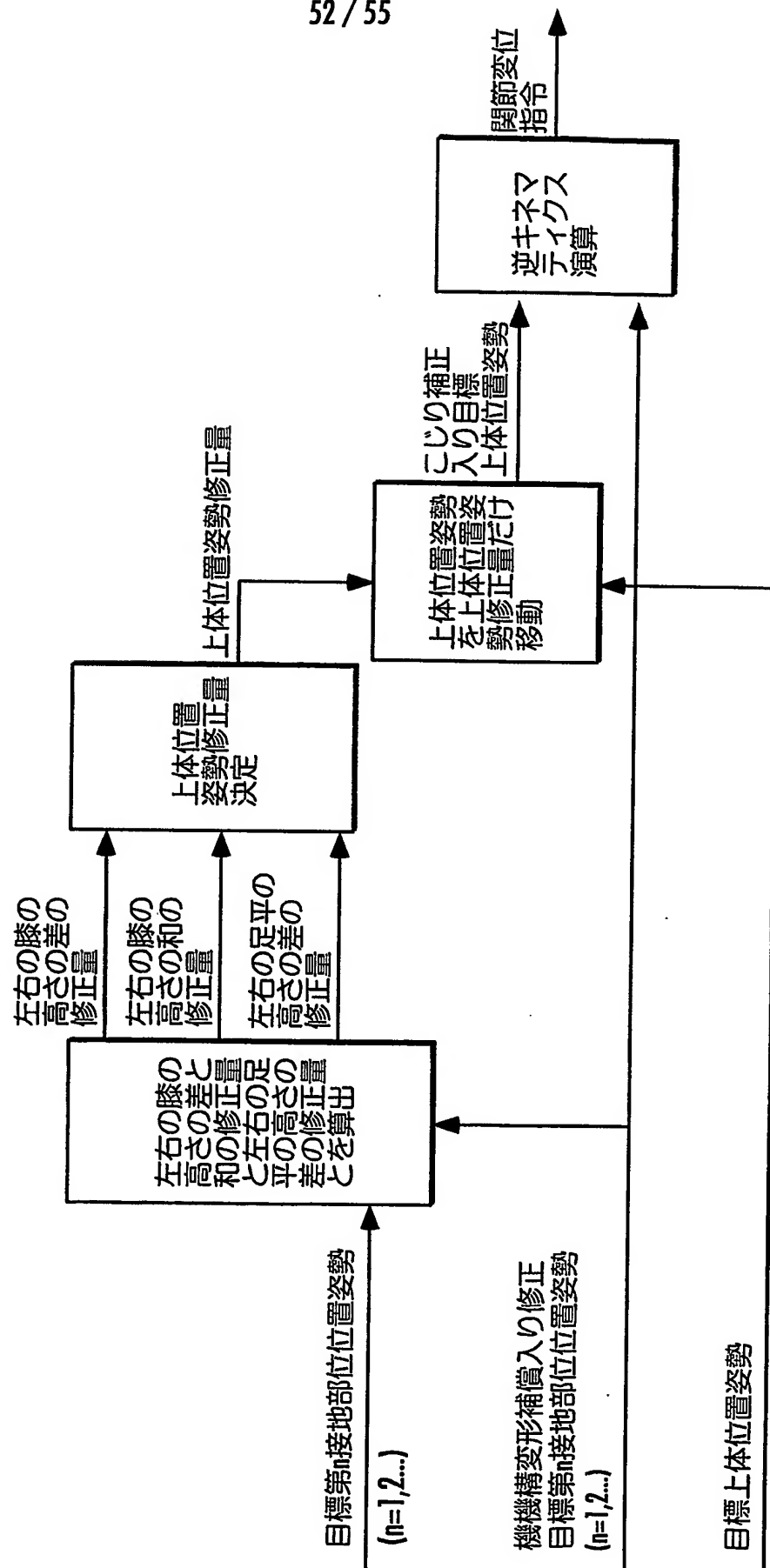


FIG.64



52 / 55

FIG.65



53 / 55

FIG.66

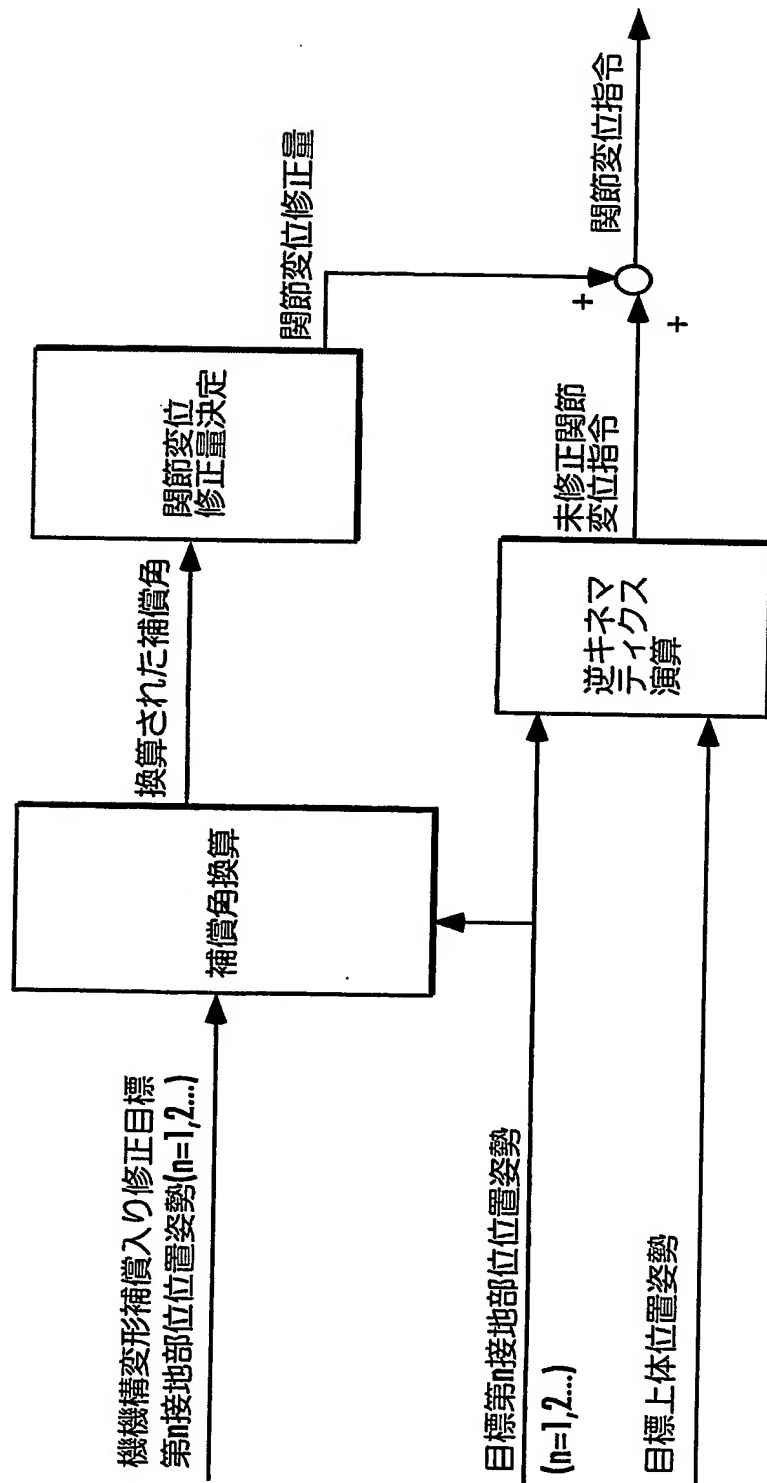


FIG. 67

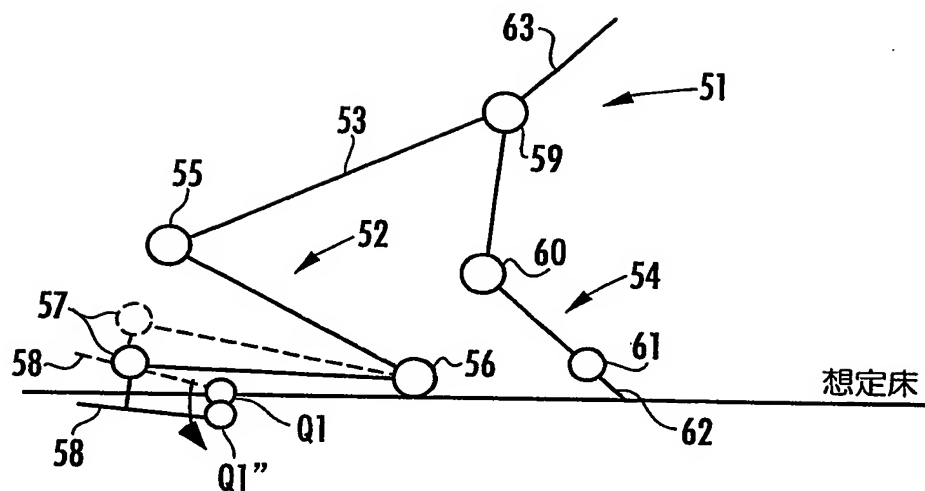
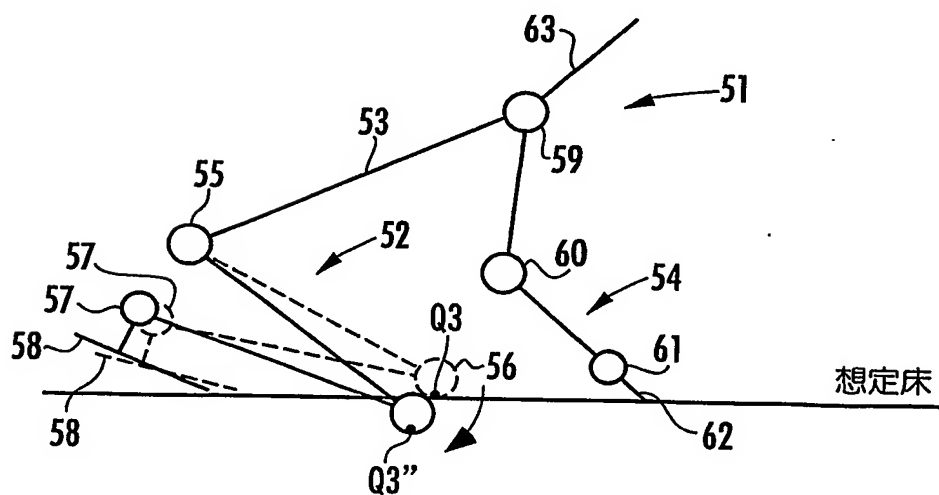


FIG. 68



55 / 55

FIG. 69

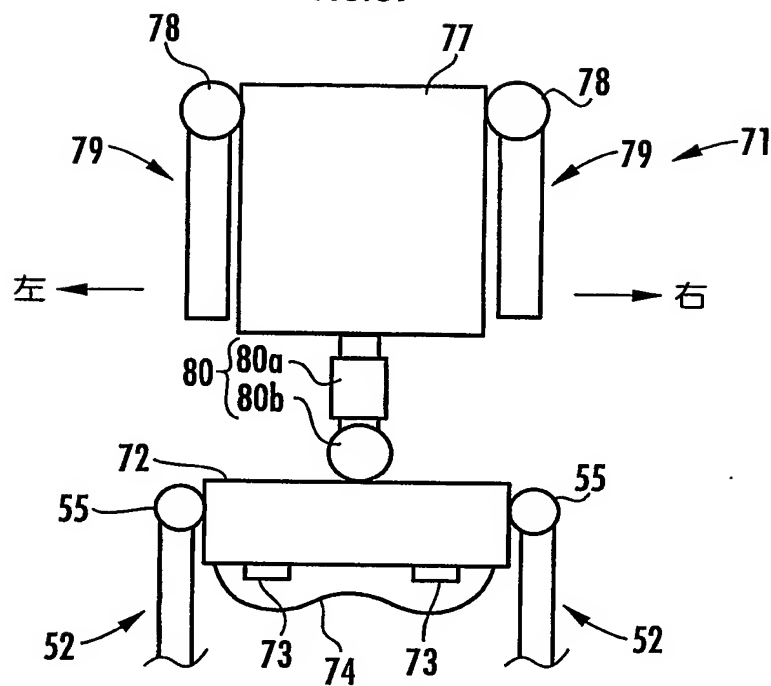
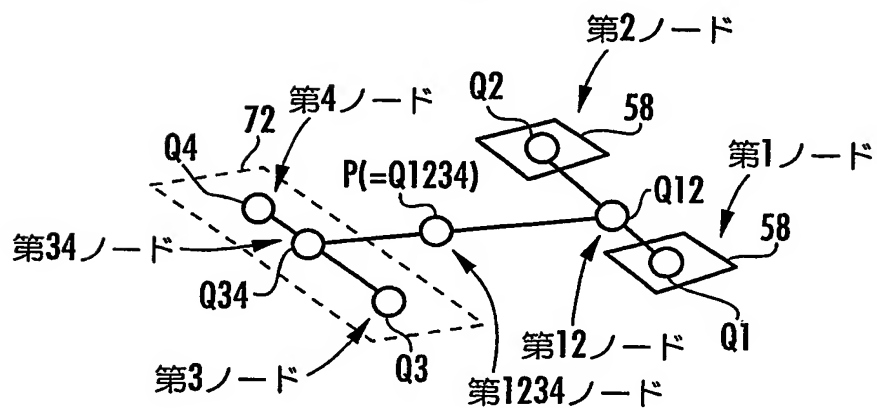


FIG.70



# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2004/018096

<b>A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER</b> Int.Cl <sup>7</sup> B25J13/00, 5/00		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
<b>B. FIELDS SEARCHED</b> Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) Int.Cl <sup>7</sup> B25J1/00-21/02		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2005 Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2005 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2005		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) JICST (JOIS)		
<b>C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT</b>		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2001-150370 A (Sony Corp.), 05 June, 2001 (05.06.01), Full text; all drawings & EP 1103450 A1 & US 6463356 B1	1-5
A	JP 2002-361575 A (Japan Science and Technology Corp.), 18 December, 2002 (18.12.02), Full text; all drawings & EP 1393867 A1 & US 2004/0060746 A1	1-5
A	JP 2001-62760 A (Honda Motor Co., Ltd.), 13 March, 2001 (13.03.01), Full text; all drawings & EP 1081026 A2 & US 6401846 B1	1-5
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 11 April, 2005 (11.04.05)		Date of mailing of the international search report 26 April, 2005 (16.04.05)
Name and mailing address of the ISA/ Japanese Patent Office		Authorized officer
Facsimile No.		Telephone No.



## A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl.<sup>7</sup> B25J13/00, 5/00

## B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl.<sup>7</sup> B25J1/00-21/02

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2005年
日本国実用新案登録公報	1996-2005年
日本国登録実用新案公報	1994-2005年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

JICST (JOIS)

## C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
A	JP 2001-150370 A (ソニー株式会社) 2001.06.05, 全文, 全図 &EP 1103450 A1 &US 6463356 B1	1-5
A	JP 2002-361575 A (科学技術振興事業団) 2002.12.18, 全文, 全図 &EP 1393867 A1 &US 2004/0060746 A1	1-5
A	JP 2001-62760 A (本田技研工業株式会社) 2001.03.13, 全文, 全図 &EP 1081026 A2 &US 6401846 B1	1-5

C欄の続きにも文献が列挙されている。

パテントファミリーに関する別紙を参照。

## \* 引用文献のカテゴリー

「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの  
「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの  
「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)  
「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献  
「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献  
「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの  
「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの  
「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの  
「&」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

11.04.2005

国際調査報告の発送日

26.4.2005

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/JP)  
郵便番号 100-8915  
東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

二階堂 恭弘

3C

3118

電話番号 03-3581-1101 内線 3324

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record.**

## **BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☐ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☒ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☒ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**